



СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ



6П12.1.06

С 36

УДК 621.319.4

Авторы: Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров, Г. Т. Назарова,
И. Ф. Переселенцев,

Силовые электрические конденсаторы. М., «Энер-
С 36 гия», 1975.

248 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров,
Г. Т. Назарова, И. Ф. Переселенцев.

В книге рассматриваются свойства активных материалов, физические процессы в диэлектрике и методы расчета характеристик силовых конденсаторов различных типов.

Книга рассчитана на студентов старших курсов вузов и аспирантов, специализирующихся в области силового конденсаторостроения, а также инженеров научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, связанных с разработкой и применением силовых конденсаторов.

С $\frac{30308-474}{051(01)-75}$ 175-75

6П2.1.06

© Издательство «Энергия», 1975 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Силовые конденсаторы находят широкое и разнообразное применение в различных областях науки и техники. Повышение требований к конденсаторам выдвигает проблему их совершенствования, наиболее быстрое и эффективное решение которой может быть достигнуто тогда, когда имеется прочный научный фундамент.

В отечественной литературе нет книги, посвященной специально силовым конденсаторам. Ряд сведений о них изложен в книгах В. Т. Ренне «Электрические конденсаторы» (1969 г.) и В. Т. Ренне, Ю. В. Багалея и И. Д. Фридберга «Расчет и конструирование конденсаторов» (1966 г.). Однако эти книги посвящены всем типам электрических конденсаторов и вопросы силового конденсаторостроения рассмотрены неполно. Сведения об импульсных конденсаторах приводятся в книге «Техника больших импульсных токов и магнитных полей» под ред. В. С. Комелькова (1970 г.) и в книге Г. С. Кучинского «Высоковольтные импульсные конденсаторы» (1973 г.), но и они недостаточно полны. За рубежом только в последнее время (1968 г.) появилась книга Ф. Либшера и В. Хельда «Конденсаторы» (изд-во Шпрингера, ФРГ), в которой рассматриваются проблемы силового конденсаторостроения. Значительное количество работ по исследованиям силовых конденсаторов опубликовано в периодической печати, которое в возрастающей мере увеличивается; однако использование их широким кругом лиц, связанных с разработкой и применением силовых конденсаторов, затруднительно и не всегда легко доступно.

Предлагаемая книга представляет собой попытку обобщить имеющийся материал с использованием опыта длительной работы авторов в области силового конденсаторостроения. При обработке материала оказалось, что его объем значительно превосходит объем книги. Поэтому ряд вопросов, как, например, электрическое

поле в силовом конденсаторе, методы испытания материалов, применяемых в конденсаторостроении, практически опущен.

Главы 4 и 8 написаны Г. С. Кучинским, гл. 1, 3, 6 и 7 — Н. И. Назаровым, гл. 9 — Г. Т. Назаровой, гл. 2 — И. Ф. Переселенцевым, § 4-4 — Г. С. Кучинским и И. Ф. Переселенцевым, гл. 5 — Н. И. Назаровым и Г. Т. Назаровой, гл. 10—12 и § 6-3 — Г. С. Кучинским и Н. И. Назаровым.

Авторы выражают благодарность В. П. Проскурнину за большой труд по рецензированию рукописи и С. М. Шахгедановой — за редактирование книги.

Авторы будут признательны всем, кто пришлет критические замечания.

Отзывы и замечания просим направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10, изд-во «Энергия».

Авторы

Глава первая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

1-1. ОСОБЕННОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Электрический конденсатор, ныне играющий важную роль в технике, появился в 1745 г., т. е. почти за 150 лет до появления кабеля и за 100 лет до появления электрической машины. Первое применение конденсата в технике сильных токов относится к концу 70-х годов XIX в. Первая установка для повышения коэффициента мощности распределительных сетей с помощью конденсаторов была создана в 1895 г. Рабочим диэлектриком этих конденсаторов была парафинированная бумага, которая к тому времени стала занимать монопольное положение как активный диэлектрик силового конденсатора. Позднее парафиновая пропитка была заменена пропиткой нефтяным маслом. В 1900 г. была предложена напрессовка тонких слоев олова на бумажные листы, что явилось прототипом современных металlobумажных конденсаторов, также находящихся применение в силовом конденсаторостроении. Массовый выпуск конденсаторов для повышения коэффициента мощности был начат фирмой «Дженерал электрик» в 1919 г. Первый силовой конденсатор с диэлектриком из синтетической пленки был создан в 1926 г. в Германии. С начала 30-х годов для пропитки силовых конденсаторов стал применяться хлордифенил. К этому же времени относится начало разработки силовых конденсаторов с избыточным давлением пропитывающей жидкости.

Зарождение силового конденсаторостроения в СССР относится к началу 30-х годов. В 1931 г. в Центральной радиолаборатории в Нижнем Новгороде (Горьком) был создан первый советский бумажно-масляный конденсатор. Однако центром зарождения конденсаторной промышленности был Киевский индустриальный институт, в котором в 1932 г. под руководством М. М. Морозова была начата разработка бумажно-масляных конденсаторов для электротермических установок и в мастерской которого был организован мелкосерийный выпуск. Позднее их производство было передано Киевскому заводу электротехнической аппаратуры (ныне «Точэлектроприбор»). В 1932 г. завод «Севкабель» начал выпуск кабельных конденсаторов связи, а в 1933 г. освоил производство импульсных бумажно-масляных конденсаторов. За период 1932—1935 гг. отечественная промышленность освоила производство конденсаторной бумаги и фольги. В 1938 г. были выпущены первые советские бумажно-сололовые конденсаторы. В 1944 г. был организован первый специа-

лизированный завод по производству силовых конденсаторов в г. Серпухове. Начало научно-исследовательской работы в СССР в области силовых конденсаторов относится также к началу 30-х годов. Первые работы были выполнены в Киевском индустриальном (ныне политехническом) институте. Позднее к ним подключились Ленинградский и Харьковский политехнические и Московский энергетический институты. Значительный вклад в развитие отечественного конденсаторостроения был внесен проф. В. Т. Ренне, написавшим первую монографию по электрическим конденсаторам. В 1963 г. был создан специальный научно-исследовательский институт конденсаторостроения в г. Серпухове.

Силовые конденсаторы применяются непосредственно в силовых сетях высокого и низкого напряжения или в силовых устройствах повышенных частот. Они применяются как отдельными единицами, так и в виде комплектных конденсаторных установок или мощных батарей с параллельно-последовательным соединением отдельных единиц. Как правило, конденсаторы эксплуатируются в длительном режиме, под воздействием (в зависимости от назначения) разнообразных форм напряжения: синусоидального промышленной или повышенных (до 10 кГц) частот; несинусоидального с постоянной составляющей или без нее; постоянного, а также импульсного с различной формой и частотой повторения импульсов. Изоляция конденсатора работает при высоких напряженностях электрического поля, значительно превосходящих рабочие напряженности в любой другой электротехнической конструкции и сравнительно высокой температуре, обусловленной внутренним тепловыделением. Кроме того, силовые конденсаторы подвержены воздействию значительных кратковременных перенапряжений. В отличие от конденсаторов, применяемых в радиоэлектронике, связи и т. п., силовые конденсаторы (за исключением нескольких типов) имеют значительный объем и массу, а также большую емкость, реактивную мощность и запасаемую энергию в конденсаторной единице.

В силовом конденсаторостроении наблюдается большое разнообразие конструктивных исполнений, а также различия в электрических характеристиках одних и тех же типов конденсаторов, обусловленные, во-первых, индивидуальными особенностями отдельных изготовителей — качеством материалов, уровнем технологии и т. п., во-вторых, назначением и условиями работы конденсаторов. Наряду с этим силовые конденсаторы имеют общие компоненты изоляции, общую конструкцию секции и пакета и пр. Эти обстоятельства делают создание классификационной системы силовых конденсаторов сложной задачей.

Выделение силовых конденсаторов в особую группу в известной мере условно, поскольку нельзя указать точного признака разделения, однако их специфичность подчеркивается определяющим словом *силовой* или *сильноточный* в названии. Силовые конденсаторы обычно классифицируются в соответствии с областями их применения, режимами работы и конструктивными особенностями. По указанным выше признакам различают конденсаторы для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной и повышенной (электротермические) частот, связи, отбора мощности, делителей напряжения, продольной компенсации линий электропередачи, для работы в линиях электропередачи постоянного тока, импульсные и пр.

1-2. КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Основу современного силового конденсатора составляют спирально намотанные плоскопрессованные секции, из которых набирается пакет, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда [Л. 1-1—1-10]. Эта форма позволяет создать наиболее экономичный конденсатор. Секции в пакете образуют параллельное, последовательное или смешанное соединение. Пакет помещается в прямоугольный или цилиндрический корпус из металла или изоляционного материала, который после прохождения цикла технологической

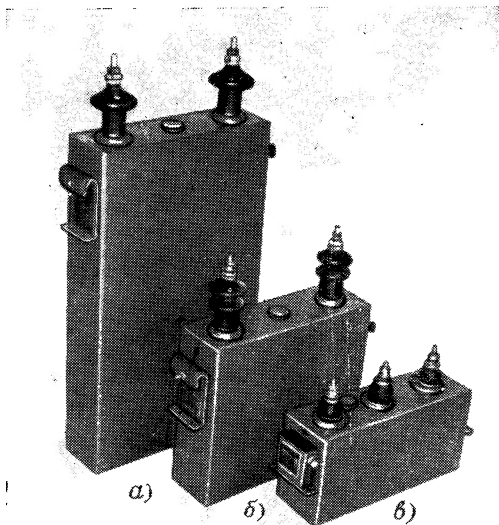


Рис. 1-1. Конденсаторы типа КС (К — косинусный, С — с синтетической пропиткой) для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной частоты.

а — КС2; б — КС1; в — КС0 (0 — нулевой габарит, 1 — первый, 2 — второй).

обработки герметизируется с тем, чтобы исключить попадание в изоляцию воздуха и влаги из окружающей атмосферы. Напряжение подводится к схеме пакета через проходные изоляторы (выводы). На рис. 1-1—1-4 показаны конструкции силовых конденсаторов.

В качестве активного диэлектрика применяются рулонная конденсаторная бумага, синтетическая пленка или комбинация бумаги с пленкой, которые под вакуумом высушиваются и пропитываются какой-либо пропитывающей массой, обычно — жидкой. При вакуумной сушке происходит удаление влаги и воздуха. Пропитка производится для замены воздуха, находящегося в порах бумаги или

между слоями пленки, массой, имеющей по сравнению с воздухом более высокую электрическую прочность и диэлектрическую проницаемость. Для обкладок используется либо алюминиевая фольга (конструкция с фольгой), либо лента диэлектрика с нанесенным на

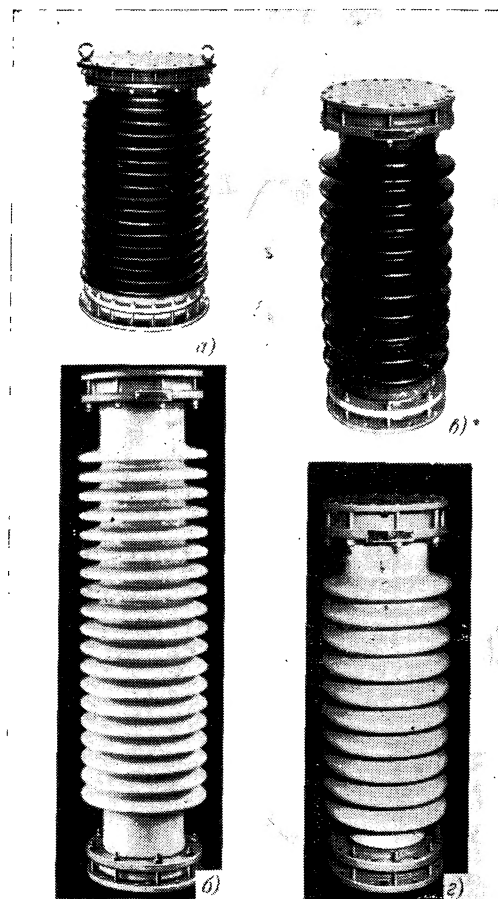
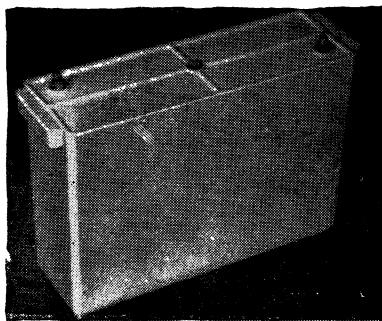
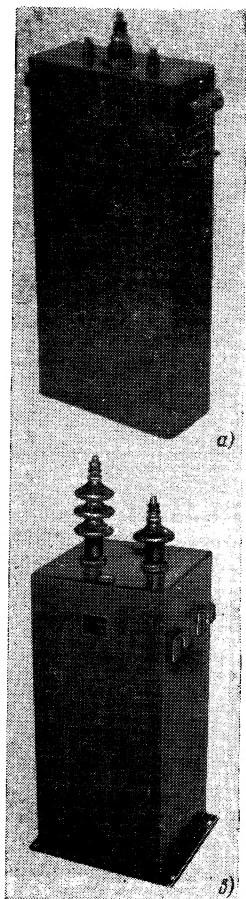


Рис. 1-2. Конденсаторы связи и делителей напряжения серии СМР (С — связи, М — с пропиткой нефтяным маслом, Р — с расширителем) и ДМР (Д — для делителей напряжения, остальное то же).

а — конденсатор связи типа СМР-166/ $\sqrt{3}$ -0,014 (наружный диаметр 700 мм, высота 1320 мм); б — конденсатор типа ДМР-160-0,00075 У1 для делителей напряжения (наружный диаметр 350 мм, высота 1380 мм); в — конденсатор связи типа СМД-66 $\sqrt{3}$ -0,0044 (наружный диаметр 279 мм, высота 890 мм); г — конденсатор серии ДМР для делителей напряжения (наружный диаметр 279 мм, высота 890 мм).

нее слоем цинка или алюминия (металлизированная конструкция). При прочих равных условиях конструкция с фольгой по сравнению с металлизированной имеет лучшие тепловые характеристики.

Намотка секций выполняется со скрытой (рис. 1-5,а) или выступающей (рис. 1-5,б) фольгой. Секции с выступающей фольгой применяются для улучшения теплоотвода из внутренних, наиболее нагретых областей конденсатора (например, в электротермических конденсаторах), а в отдельных случаях — для уменьшения индуктивности конденсаторов. Как правило, в конструкциях, где секции вклю-



б)

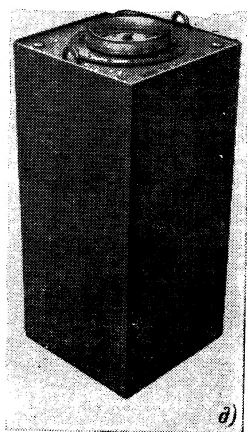
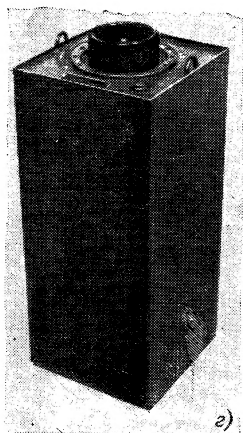
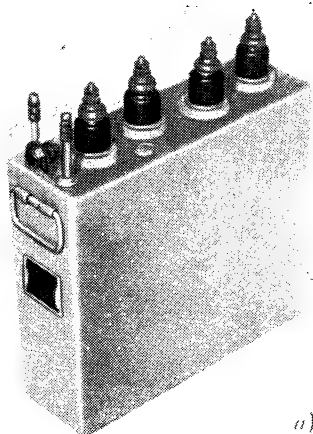


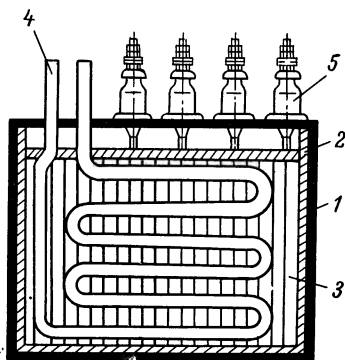
Рис. 1-3. Импульсные конденсаторы серии ИК (И — импульсный, К — с пропиткой касторовым маслом).
а — импульсный конденсатор типа ИК-6-150ТС4; б — импульсный конденсатор типа ИК-100-0,25-У4; в — импульсный конденсатор типа ИКГ-50-1У4 (Г — для гидравлического эффекта); г — импульсный конденсатор типа ИК-25-2У4; д — импульсный конденсатор типа ИКМ-50-3 (М — малондуктивный).

чаются параллельно, каждая из них снабжается индивидуальным плавким предохранителем, отключающим секцию в случае ее пробоя. Иногда секция составляется из нескольких подсекций, соединенных последовательно. В качестве примера на рис. 1-5, а показана секция на двойное напряжение [Л. 1-11]. Одна обкладка, являющаяся общей для обеих подсекций, наматывается скрыто. Кроме нее наматываются две другие, электрически не соединенные между собой. Края этих обкладок могут выступать при намотке. Здесь в одной секции получаются две последовательно соединенные подсекции. Такая конструкция может иметь различные модификации [Л. 1-12].

Секция наматывается на цилиндрическую или плоскую оправку, складывается



а)



б)

Рис. 1-4. Конструкция конденсатора для электротермических установок серии ЭСВ (Э — электротермический, С — с синтетической пропиткой, В — водяное охлаждение).

а — внешний вид; б — элементы конструкции; 1 — корпус; 2 — изоляция пакета от корпуса; 3 — секция; 4 — охлаждающая трубка; 5 — проходной изолятор.

пополам по диаметру и превращается в плоскопрессованную. Диэлектрик в секции представляет собой последовательно расположенные слои пропитанной бумаги или пленки и пропитывающего состава. Схема замещения диэлектрика представлена на рис. 1-6, на котором обозначено: d_k — эквивалентная толщина клетчатки, $d_{п}$ — пленки и $d_{ж}$ — пропитывающей жидкости.

Вследствие упругости листы диэлектрика и фольги неплотно прилегают друг к другу, между ними остается некоторое пространство, заполняемое пропитывающим диэлектриком. Размер этого пространства можно варьировать, меняя давление на плоские стороны секции или, как принято называть, степень сжатия или запрессовки. Вследствие этого изменяются толщина секции, ее ϵ , $\tan \delta$ и другие характеристики.

В [Л. 1-13] предложено оценивать степень сжатия секций через коэффициент запрессовки k :

$$k = d_T / (d_T + d_{ж}) = (nd_1 + n'd'_1) / d, \quad (1-1)$$

где $d_T = nd_1 + n'd'_1$ — толщина листов твердой фазы диэлектрика; d_1 и n — соответственно толщина одного листа и число листов бу-

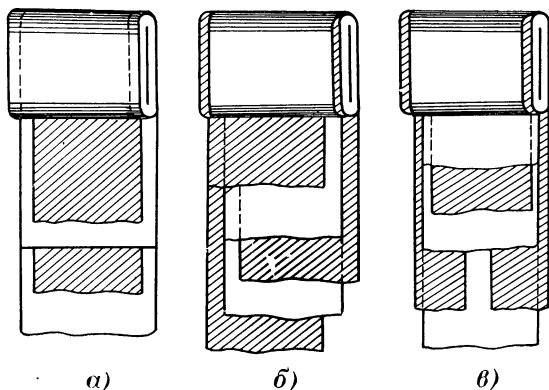


Рис. 1-5. Конструкция секций конденсаторов.

маги; d'_1 и n' — то же пленки; $d_{ж}$ — суммарная толщина прослоек свободного пропитывающего диэлектрика между листами; $d = d_T + d_{ж}$ — фактическая толщина диэлектрика между обкладками.

При этом предполагается, что листы твердого диэлектрика имеют равномерную толщину и удалены друг от друга на одинаковое расстояние, что не всегда имеет место в реальном диэлектрике, однако такая схема дает хорошее совпадение с опытом. Из (1-1) следует:

$$d = (nd_1 + n'd'_1) / k. \quad (1-2)$$

По известным nd_1 и $n'd'_1$, задавшись значением k , из формулы (1-2) можно найти значение d (фактическую толщину диэлектрика между обкладками). Значение k берется обычно в пределах 0,9—0,95. При этом давление на плоские стороны секций составляет около 0,5 МПа. Слишком сильное сжатие ($k > 0,95$) может привести к повреждению диэлектрика и снизить его электрическую прочность.

В большинстве конструкций пакет прессуется отдельно и является самостоятельной конструктивной единицей. В некоторых конструкциях набор секций, образующих пакет, вспрессовывается непосредственно в корпус, которым он и удерживается в спрессованном состоянии.

подавляющее большинство конденсаторов (для повышения коэффициента мощ-

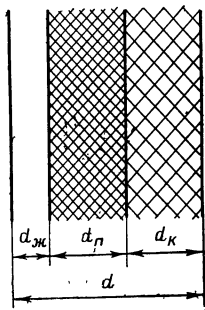


Рис. 1-6. Схема замещения диэлектрика конденсатора.

ности, электротермические, часть импульсных и пр. (рис. 1-1, 1-3, 1-4) имеют форму корпуса в виде прямоугольного параллелепипеда. В ряде случаев и особенно там, где требуются значительные изоляционные расстояния, применяется цилиндрическая форма корпуса (конденсаторы связи, отбора мощности, для делителей напряжения, некоторые типы импульсных и пр., см. рис. 1-2). Как правило, изготавливаются конденсаторы в таких корпусах на напряжения от 35 кВ и выше. Одновременно они используются и как несущая высоковольтная изоляционная конструкция для других элементов схемы.

При изготовлении прямоугольных корпусов используются металлы (сталь, латунь, алюминий) и различные изоляционные материалы (политропилен, полиамид и пр.). Металлические корпуса применяются для конденсаторов со значительным тепловыделением, изоляционные — для конденсаторов на высокие напряжения, тепловыделение в которых ничтожно. Цилиндрические корпуса изготавливаются преимущественно из изоляционных материалов (фарфор, бакелизированная бумага). Герметизация металлических и изоляционных прямоугольной формы корпусов достигается сваркой и пайкой, а для изоляционных цилиндрических — с помощью резиновых уплотнений.

Условия массового производства требуют максимального сокращения типоразмеров корпусов. Поэтому металлические корпуса конденсаторов для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной частоты (типа КС), выпуск которых составляет до 70% общего выпуска конденсаторов, имеют только три типоразмера или габарита: второй (рис. 1-1,а), первый (рис. 1-1,б) и нулевой (рис. 1-1,в). Это обеспечивает достаточно широкий диапазон мощностей в конструктивной единице, составляющих 4—150 квар для высоковольтных конденсаторов. Площадь основания у всех габаритов одинакова и составляет 380×120 мм. Этот размер сохраняется и для металлических корпусов унифицированной серии конденсаторов других типов. Высота корпуса нулевого габарита составляет 180 мм, первого — 325 мм и второго — 640 мм. Конденсаторы выпускаются в соответствии с ГОСТ 1282-72 «Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока частоты 50 Гц».

Этим ГОСТ предусматривается выпуск четырех серий конденсаторов, различающихся своими удельными характеристиками. В настоящее время из них выпускаются только третья и четвертая серии. Напряженности электрического поля в диэлектрике конденсаторов третьей серии составляют 15—17 МВ/м для низковольтных и 17—18 МВ/м для высоковольтных; для четвертой серии соответственно 15—17 МВ/м и 20—21 МВ/м. Габариты, массы и удельные характеристики конденсаторов можно найти или рассчитать по данным ГОСТ 1282-72.

Электротермические конденсаторы типа ЭСВ (рис. 1-4,а, б), занимающие второе место в выпуске конденсаторной продукции, выпускаются в соответствии с ГОСТ 18689-73 «Конденсаторы для электротермических установок на частоту 0,5 до 10,0 кГц» и имеют только один габарит с высотой корпуса 350 мм. Рабочие напряженности поля в диэлектрике таких конденсаторов составляют при номинальной частоте 0,5 кГц — от 15,5 до 16 МВ/м; при 1 кГц — около 12,5 МВ/м; при 2,4 кГц — от 8 до 9 МВ/м; при 4 кГц — от 7 до 7,5 МВ/м; при 10 кГц — от 4,5 до 5 МВ/м.

Конденсаторы связи, отбора мощности и делителей напряжения типов СМР, ОМР и НДЕ (рис. 1-2, а—г) изготавливаются в цилиндрических фарфоровых корпусах по ГОСТ 15581-70 «Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности и измерения напряжения в фарфоровых корпусах». Напряженности поля в них составляют от 7 до 12—13 МВ/м. Конденсаторы изготавливаются в виде отдельных элементов, из которых комплектуются колонны на соответствующее напряжение фазы линии электропередачи. Импульсные конденсаторы выпускаются в металлических корпусах как унифицированного размера (первый и второй габариты), так и в корпусах других размеров (рис. 1-3, а—д). Такое многообразие конструктивных исполнений этих конденсаторов обусловлено особенностями тех установок, в которых они работают.

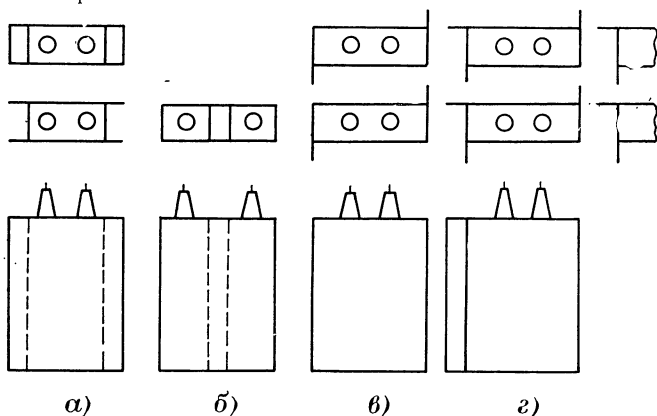


Рис. 1-7. Конструкции конденсаторов с интенсифицированным теплоотводом.

а — открытая и замкнутая Н-форма; б — с каналом посередине; в — Z-форма; г — двойная Z-форма.

Названные выше типы конденсаторов для наружного исполнения изготавливаются для работы в умеренном, тропическом климате и для северных районов. Конденсаторы для районов с холодным климатом (так называемого «северного исполнения») отличаются от обычных конденсаторов для умеренного климата тем, что материалы, используемые для этих конденсаторов, должны обеспечивать нормальную работу их при температуре до минус 60—65°C. В первую очередь это относится к пропитывающему диэлектрику, который должен иметь соответствующую температуру застывания, а также и другим материалам, например уплотняющим резинам для конденсаторов в изоляционных корпусах.

Все конденсаторы, за исключением электротермических, предназначены для работы при естественном охлаждении. Ввиду значительных потерь, которые не могут быть отведены при естественном охлаждении, в электротермических бумажных конденсаторах применяется принудительное водяное охлаждение. В конструкциях с естественным охлаждением теплоотдача в окружающую среду осуществляется с поверхности корпуса за счет лучеиспускания и

естественной конвекции. На рис. 1-7,а и б, показана конструкция конденсатора с естественным охлаждением, содержащая воздушные каналы («трубы») по бокам или в середине металлического корпуса, в которых возникает каминный эффект, интенсифицирующий теплообмен [Л. 1-14]. В ряде случаев применяется принудительное воздушное охлаждение, осуществляемое или простым обдувом с помощью вентилятора конденсатора обычной конструкции или применением специальных конструкций корпуса, показанных на рис. 1-7,в, г. При компоновке из них батарей, дополнительные конструктивные элементы корпуса образуют вентиляционные каналы, по которым прогоняется охлаждающий воздух [Л. 1-14].

В конденсаторах с принудительным водяным охлаждением в отличие от рассмотренных выше имеется змеевик из медной трубки, по которому протекает охлаждающая вода. В одной, наиболее распространенной конструкции змеевик напаявается непосредственно на выступающую фольгу одного полюса всех секций, как показано на рис. 1-4,б. Охлаждающая система и связанный с нею корпус конденсатора находятся под напряжением. В другой конструкции каждая секция изолируется на полное испытательное напряжение и в пакете между ними прокладывается медная фольга, на которую напаяется охлаждающий змеевик [Л. 1-15]. В этом случае ни охлаждающая система, ни корпус не находятся под напряжением. При изготовлении таких конденсаторов должны применяться активные диэлектрические материалы с меньшим $\tan \delta$, поскольку теплоотводящая способность такой конструкции ниже по сравнению с первой.

Прокладные фарфоровые изоляторы могут иметь различные исполнения в зависимости от конструкции выводов, которые могут быть в виде цилиндрических стержней, плоских шин, коаксиальных цилиндров и пр. Изоляторы герметично соединены с корпусом конденсатора. Герметичность соединения фарфора с металлом достигается в большинстве случаев металлизацией узких участков фарфора, к которым затем припаивается переходная металлическая арматура. С ее помощью изолятор герметично припаивается к корпусу; сверху на него напаяется колпачок, служащий для присоединения конденсатора к внешней цепи. Фирма BICC (Англия) производит герметизацию впрессовкой фарфорового изолятора в переходное кольцо и колпачок. Для этого посадочные места на изоляторе шлифуются с точностью до 0,01 мм и по его периметру протачивается канавка, в которую закладывается уплотняющая неопреновая резина. Колпачок и кольцо также протачиваются в размер изолятора, после чего напрессовываются на него с помощью пресса.

Недостатком обычно применяемых токоподводов является их значительная индуктивность. Для ее снижения в импульсных конденсаторах применяются специальные конструкции выводов, показанные на рис. 1-8,а, б. В конструкции рис. 1-8,а [Л. 1-16] собственные выводы 1 представляют медные листы, изогнутые под углом 90°. Они герметично проходят через изоляционную часть 4 крышки и разделены изолирующей прокладкой 6 снаружи и бумажно-пропитанной изоляцией 7 внутри конденсатора. Металлическая арматура 5 крышки служит для приварки ее к стенкам корпуса 8. Токоотводы 3 от секций подводятся к сборным шинам 2, соединенным болтами с отводами 1.

Более сложную конструкцию имеет вывод, показанный на рис. 1-8,б [Л. 1-17]. Он состоит из диска сложного профиля 1, вы-

полняемого обычно из эпоксидной смолы. В него впрессовано проходное металлическое кольцо 2 с уплотнительной резиновой прокладкой 3. С помощью этого кольца диск 1 приваривается или припаявается к прямоугольной части 4 крышки по линии 5. Для лучшей герметизации шва предусматривается уплотнительная резиновая прокладка 6. Через отверстие в центре диска 1 проходит тоководу-

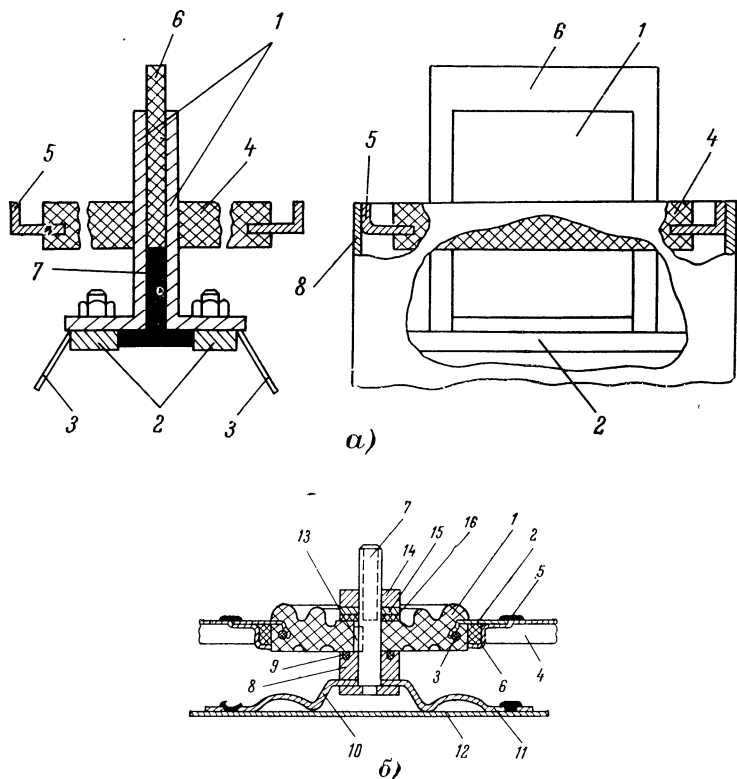


Рис. 1-8. Конструкции малоиндуктивных выводов.

щая часть вывода. Она состоит из стержня с резьбой 7, на который надета втулка 8 с проточкой в верхней части для уплотнительной резины 9. Во втулке 8 закреплена гофрированная диафрагма 10 из тонкого деформируемого хорошо проводящего материала. По периметру периферийной плоской части 11 диафрагмы расположены отверстия, с помощью которых она пайкой или иным способом соединяется жестко с контактной пластиной 12. В свою очередь контактная пластина 12 жестко соединяется с выступающей фольгой секции. Шпонка 13 служит для исключения перемещения диска 1 относительно стержня 7. С помощью гайки 14 с шайбой 15 производится окончательная сборка всего вывода. Резиновое кольцо 16 слу-

жит для уплотнения. Эта конструкция применима в конденсаторах, у которых имеется только один изолированный вывод (вторым выводом является корпус).

1-3. КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ ОБЪЕМА ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Жидкий диэлектрик занимает значительную часть общего объема конденсатора. Он работает в широком интервале температур, вследствие чего имеет место значительное изменение его объема. Поэтому вопрос о компенсации температурного расширения его объема имеет важное значение. В конденсаторах с мегаллическими

корпусами компенсация осуществляется за счет деформации широких стенок корпуса. Поэтому при конструировании размеры пакета должны быть выбраны так, чтобы обеспечивалось беспрепятственное перемещение широких стенок вследствие изменения объема жидкости во всем диапазоне изменения температуры диэлектрика. Для компенсации температурного изменения объема жидкости у конденсаторов в фарфоровых крышках, стенки которых не деформируются, используются специальные металлические компенсаторы (расширители) мембранного типа с гофрированными стенками (рис. 1-9,а).

При нормальных условиях (нормальном давлении и температуре 293 К), в которых изготавливается расширитель, его стенки занимают положение А (рис. 1-9,б). В этом положении давление воздуха внутри расширителя уравнивается его давлением извне. При охлаждении расширителя до температуры $T_{\text{мин}}$, соответствующей минимальной температуре диэлектрика, и нормальном окружающем давлении стенки расширителя займут положение В, поскольку объем воздуха в нем уменьшится. Это положение является исходным для расчета величины компенсирующего объема. Если поместить теперь расширитель в конденсатор, имеющий температуру диэлектрика $T_{\text{макс}}$, соответствующую максимальной температуре, то вследствие увеличения объема жидкости стенки расширителя займут

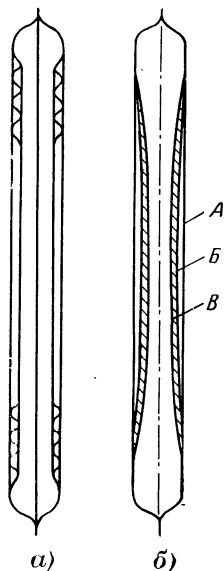


Рис. 1-9. Расширитель.

а — конструкция; б — схема работы.

положение В, находящееся вблизи предела упругой деформации материала $P_{\text{доп}}$. Заштрихованный объем соответствует наибольшему допустимому объему компенсации одного расширителя, и расчет компенсации сводится к определению необходимого числа n расширителей. Для идеального расширителя с бесконечно тонкими стенками во всем интервале рабочих температур должно соблюдаться условие [Л. 1-18, 5-3]

$$\Delta V_{\text{ж}} \leq n \Delta V_{\text{р}}, \quad (1-3)$$

откуда

$$n \geq \Delta V_{\text{ж}} / \Delta V_{\text{р}}, \quad (1-4)$$

где $\Delta V_{\text{ж}}$ — изменение объема жидкости; $\Delta V_{\text{р}}$ — то же одного расширителя; n — число расширителей.

Значение $\Delta V_{\text{ж}}$ находится из соотношения

$$\Delta V_{\text{ж}} = V_{\text{ж.мин}} \alpha_{\text{ж}} (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}), \quad (1-5)$$

где $V_{\text{ж.мин}}$ — объем жидкости при температуре $T_{\text{мин}}$; $\alpha_{\text{ж}}$ — коэффициент объемного расширения жидкости (среднее значение в интервале рабочих температур).

Изменение объема одного расширителя $\Delta V_{\text{р}}$ определяется из уравнения Клапейрона

$$\Delta V_{\text{р}} = \frac{V_{\text{р.ном}}}{293} \left(\frac{T_{\text{мин}}}{P_{\text{в.мин}}} - \frac{T_{\text{макс}}}{P_{\text{в.макс}}} \right); \quad (1-6)$$

где $V_{\text{р.ном}}$ — номинальный объем расширителя; $P_{\text{в.мин}}$ — давление воздуха в расширителе, соответствующее $T_{\text{мин}}$. Оно находится из зависимости $P_{\text{в}} = f(T_{\text{мин}})$, определяемой экспериментально для каждой конструкции расширителя и задаваемой обычно графически; $P_{\text{в.макс}}$ — давление воздуха в расширителе, соответствующее $T_{\text{макс}}$. Оно определяется графически, как это показано на рис. 1-10, по кривым $V_{\text{р}} = f(P)$ и $V_{\text{р}} = \varphi(P_{\text{в}})$, где P — внешнее давление на стенки расширителя, т. е. давление жидкости, и $V_{\text{р}}$ — текущий объем расширителя. Для давления жидкости в конденсаторе P' , выбранного так, чтобы $0,75P_{\text{доп}} \leq P' \leq P_{\text{доп}}$, из точки P' проводим ординату до пересечения ее с кривой $V_{\text{р}} = f(P)$ в точке A . Через точку A , проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения ее с кривой $V_{\text{р}} = \varphi(P_{\text{в}})$, соответствующей требуемой температуре в точке B . Отрезок OB в выбранном масштабе дает искомое значение $P_{\text{в.макс}}$ или другое значение, соответствующее текущей температуре T .

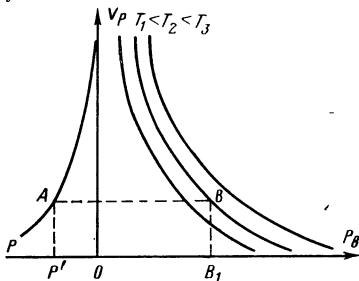


Рис. 1-10. Графическое определение $P_{\text{в.макс}}$.

Окончательное выражение для определения числа расширителей, в котором учитываются особенности реальных конструкций, а именно: толщина их стенок, разброс характеристик и т. п., согласно [Л. 1-18] записывается в виде

$$n \geq \frac{293 k_{\text{р}} V_{\text{ж.р}} \alpha_{\text{ж}} (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}})}{V_{\text{р.ном}} (T_{\text{мин}}/P_{\text{в.мин}} - T_{\text{макс}}/P_{\text{в.макс}}) + (293 V_{\text{с.р}}/V_{\text{р.ном}} + T_{\text{мин}}/P_{\text{в.мин}}) \alpha_{\text{ж}} (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}})}, \quad (1-7)$$

где $1,05 \leq k_{\text{р}} \leq 1,2$ — коэффициент, учитывающий разброс характеристик расширителей; $V_{\text{ж.р}} = V - V_{\text{д}}$ — объем конденсатора, занятый жидкостью и расширителями (V — внутренний объем корпуса, $V_{\text{д}}$ — объем, занятый твердыми деталями); $V_{\text{с.р}}$ — объем, занимаемый стенками расширителя.

Если число расширителей n известно, то может быть решена обратная задача об определении давления жидкости в конденсаторе

при любой текущей температуре. Для этого сначала находим давление воздуха в расширителе [Л. 1-18, 5-3]:

$$P_{\text{в}} = \frac{T}{T_{\text{мин}}/P_{\text{в.мин}} - (293 + 293V_{\text{ж.ном}}/nV_{\text{р.ном}} - T_{\text{мин}}/P_{\text{в.мин}}) \alpha_{\text{ж}} (T - T_{\text{мин}})}, \quad (1-8)$$

где T — температура, при которой определяется давление; $V_{\text{ж.ном}}$ — номинальный объем жидкости при нормальных условиях.

Затем с помощью кривых, приведенных на рис. 1-10, по полученному значению $P_{\text{в}}$ находим искомое давление жидкости.

Глава вторая

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

2-1. КОНДЕНСАТОРНАЯ БУМАГА

В качестве твердого компонента рабочего диэлектрика в силовых конденсаторах продолжает применяться конденсаторная бумага, пропитанная различными жидкими диэлектриками. Достоинствами бумаги как

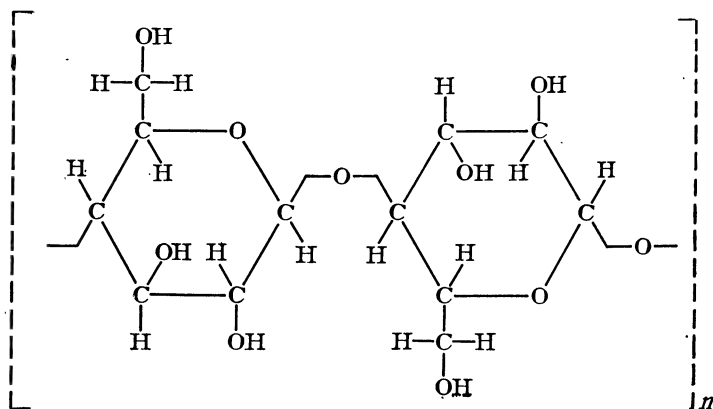


Рис. 2-1. Структура молекулы альфа-целлюлозы.

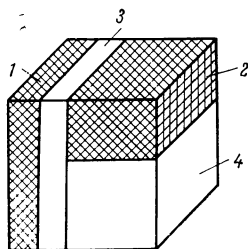
диэлектрика являются в первую очередь ее электрические характеристики, дающие возможность получать значительную энергию и мощность в единице объема конденсатора. Другими достоинствами бумаги являются ее хорошие физико-механические свойства, позволяющие

механизировать процесс изготовления секций и прессовку их в пакеты.

Исходным сырьем для изготовления бумаги является сульфатная древесная целлюлоза, получаемая варкой хвойной древесины в щелочной среде с целью удаления смол и лигнина, резко снижающих термостойкость древесного волокна. Основной составляющей (85—95%) сульфатной целлюлозы является клетчатка (альфа-целлюлоза), представляющая собой природное высокомолекулярное вещество — $(C_6H_{10}O_5)_n$. Молекула этого вещества состоит из большого количества глюкозных колец, связанных кислородными мостиками (рис. 2-1). Число

Рис. 2-2. Комбинированная последовательно-параллельная эквивалентная схема конденсаторной бумаги.

1 — параллельная часть клетчатки; 2 — последовательная часть клетчатки; 3, 4 — соответственно параллельная и последовательная части вещества, заполняющего поры.



колец n в одной молекуле характеризует степень полимеризации вещества и находится в пределах 1000—2000. В каждом кольце содержится по три гидроксильные группы — OH, обуславливающие полярность альфа-целлюлозы и изготавливаемой из нее бумаги. В [Л. 1-1, 2-1] приводятся различные значения параметров клетчатки, измеренные при 20°C и частоте 50 Гц: относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_k/\epsilon_0 = 5 \div 7$, плотность $\gamma_k = (1,5 \div 1,55) 10^3$ кг/м³, $\operatorname{tg} \delta_k = (6 \div 7) 10^{-3}$. Опыт проектирования отечественных силовых конденсаторов показал, что хорошее совпадение расчетных и опытных данных по емкости получается при $\epsilon_k/\epsilon_0 = 6,5$ и $\gamma_k = 1,55 \times 10^3$ кг/м³. По значению $\operatorname{tg} \delta$ расчетные и опытные данные имеют значительное расхождение в связи с тем, что на $\operatorname{tg} \delta$ бумажного диэлектрика оказывает влияние не только $\operatorname{tg} \delta_k$, но и целый ряд других факторов. В области температур минус 80—90°C при $f = 50$ Гц $\operatorname{tg} \delta_k$ имеет максимум, значение которого примерно на порядок выше $\operatorname{tg} \delta$ при 20°C. С увеличением частоты максимум смещается в сторону повышения температуры. Диэлектрическая проницаемость клетчатки уменьшается

с понижением температуры и в области температур от -80 до $+100^{\circ}\text{C}$ при $f=50$ Гц имеет температурную зависимость, близкую к линейной.

Для расчета диэлектрической проницаемости ϵ , $\text{tg } \delta$ и электрической прочности $E_{\text{пр}}$ одиночного (пропитанного и непропитанного) бумажного листа при использовании последовательной эквивалентной схемы (рис. 1-6) [Л. 1-1] были предложены формулы, связывающие эти параметры с физическими характеристиками бумаги и пропитывающей жидкости. С целью использования этих формул для расчета параметров реальных секций в них позднее были внесены поправки, учитывающие коэффициент запрессовки (k) и влажность бумаги [Л. 1-13, 2-2—2-4]. С учетом указанных уточнений формулы имеют вид:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{ж}} / [1 - \gamma_{\text{п}}(1 - \beta)]; \quad (2-1)$$

$$\text{tg } \delta = \frac{\beta \gamma_{\text{п}} \text{tg } \delta_{\text{к}}}{1 - \gamma_{\text{п}}(1 - \beta)} + \frac{(1 - \gamma_{\text{п}}) \text{tg } \delta_{\text{ж}}}{1 - \gamma_{\text{п}}(1 - \beta)}, \quad (2-2)$$

где $\gamma_{\text{п}} = \frac{100 - \omega}{100} k \frac{\gamma_{\text{б}}}{\gamma_{\text{к}}}$; $\beta = \frac{\epsilon_{\text{ж}}}{\epsilon_{\text{к}}}$;

$\gamma_{\text{п}}$ — относительная плотность и $\gamma_{\text{б}}$ — плотность сухой бумаги; $\epsilon_{\text{ж}}$, $\text{tg } \delta_{\text{ж}}$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь вещества, заполняющего поры (воздух или пропитывающие диэлектрики); ω — влажность бумаги. Для последовательно-параллельной схемы замещения (рис. 2-2) диэлектрическая проницаемость изоляции в целом определяется по формуле [Л. 2-5, 2-6]:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{к}} V_{\text{к.п}} + \epsilon_{\text{ж}} V_{\text{ж.п}} + \epsilon_{\text{к}} \epsilon_{\text{ж}} (V_{\text{к.с}} + V_{\text{ж.с}}) / (\epsilon_{\text{к}} V_{\text{ж.с}} + \epsilon_{\text{ж}} V_{\text{к.с}}), \quad (2-3)$$

где $V_{\text{к.п}}$ — относительный объем клетчатки, включенной параллельно; $V_{\text{ж.п}}$ — то же пропитывающего диэлектрика; $V_{\text{к.с}}$ — относительный объем клетчатки, включенный последовательно; $V_{\text{ж.с}}$ — то же для пропитывающего диэлектрика.

Относительные объемы, занимаемые клетчаткой и пропитывающим диэлектриком, связаны соотношениями:

$$V_{\text{к.п}} + V_{\text{ж.п}} + V_{\text{к.с}} + V_{\text{ж.с}} = 1; \quad (2-4)$$

$$V_{\text{к.п}} + V_{\text{к.с}} = \gamma_{\text{б}} / \gamma_{\text{к}}. \quad (2-5)$$

В соответствии с этой схемой получено следующее выражение:

$$\text{tg } \delta = (A + K_{\text{б}} B) / (A + B), \quad (2-6)$$

где

$$A = \frac{V_{\text{к.п}}}{K_{\varepsilon}} (K_{\varepsilon} V_{\text{к.с}} + V_{\text{ж.с}})^2 + K_{\varepsilon} V_{\text{к.с}} (V_{\text{к.с}} + V_{\text{ж.с}})^2; \quad (2-7)$$

$$B = V_{\text{ж.п}} (K_{\varepsilon} V_{\text{к.с}} + V_{\text{ж.с}})^2 + V_{\text{ж.с}} (V_{\text{к.с}} + V_{\text{ж.с}})^2; \quad (2-8)$$

$$K_{\delta} = \operatorname{tg} \delta_{\text{ж}} / \operatorname{tg} \delta_{\text{к}}; \quad (2-9)$$

$$K_{\varepsilon} = \varepsilon_{\text{ж}} / \varepsilon_{\text{к}}. \quad (2-10)$$

Параллельная часть объема клетчатки может быть выражена через последовательную как $V_{\text{к.п}} = n V_{\text{к.с}}$, где $0 \leq n \leq 0,333$, а в среднем $n = 0,143$. Согласно [Л. 2-7] расчет ε по (2-3) для листа бумаги плотностью $\gamma_{\text{б}} = 9 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$ дает лучшее совпадение с опытными данными; при большей плотности бумаги применение этой схемы не дает преимуществ.

В [Л. 1-13] предложен метод расчета ε и $\operatorname{tg} \delta$ изоляции, учитывающий неравномерность распределения клетчатки в бумажном листе. Сущность этого метода состоит в следующем: если по оси абсцисс откладывать площадь x , занимаемую диэлектриком между обкладками, а по оси ординат — относительную толщину y , занимаемую клетчаткой в каждом элементарном объеме, то получим некоторую кривую $y = f(x)$, являющуюся функцией распределения толщины клетчатки в пространстве между обкладками. Выберем масштабы так, чтобы значение $x = 1$ соответствовало 1 см^2 площади изоляции, а $y = 1$ — ее толщине d . Тогда для этой функции справедливы условия: $y = 0$ при $x = 0$ и $y = 1$ при $x = 1$. Функция, удовлетворяющая этим условиям, может быть представлена в виде

$$y = f(x) = x^n. \quad (2-11)$$

Однако здесь неизвестно значение показателя степени n . Для его определения проинтегрируем (2-11) в пределах от 0 до 1. Очевидно, что интеграл должен быть равен приведенной плотности бумаги $\gamma_{\text{п}}$, т. е.

$$\int_0^1 x^n dx = \frac{1}{n+1} = \gamma_{\text{п}}. \quad (2-12)$$

Формула (2-12) дает связь между n и $\gamma_{\text{п}}$, и теперь значение n может быть однозначно определено.

Разбивая площадь обкладок на ряд элементарных площадок и применяя к i -му объему диэлектрика, опи-

рающемся на i -ю площадку, обычную последовательную схему для расчета ε и $\operatorname{tg} \delta$ по (2-1) и (2-2) с заменой в них средней плотности ее текущим значением из (2-11), имеем:

$$\varepsilon_i = \beta \varepsilon_{\text{ж}} / 1 - (1 - \beta) x^n; \quad (2-13)$$

$$\operatorname{tg} \delta_i = \frac{\beta x^n \operatorname{tg} \delta_{\text{к}}}{1 - (1 - \beta) x^n} + \frac{(1 - x^n \operatorname{tg} \delta_{\text{ж}})}{1 - (1 - \beta) x^n}. \quad (2-14)$$

Поскольку все элементарные объемы соединены параллельно, то значение ε всей изоляции есть сумма всех ε_i или в пределе $\varepsilon = \int_0^1 \varepsilon_i(x) dx$. Аналогичная картина име-

ет место и для $\operatorname{tg} \delta$ изоляции. Это доказывается, исходя из того, что общие потери мощности есть сумма потерь мощности в элементарных объемах.

Окончательные формулы имеют вид:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{к}} n_{\varepsilon}; \quad (2-15)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_{\text{к}} n_{\delta} / n_{\varepsilon}, \quad (2-16)$$

где

$$n_{\varepsilon} = \frac{(1 - 2\gamma_{\text{п}}) \beta}{(1 - \beta) \gamma_{\text{п}} (1 - \gamma_{\text{п}})} \ln \frac{\beta}{1 - (1 - \beta) \gamma_{\text{п}}} - \frac{(1 - \gamma_{\text{п}}) \beta}{\gamma_{\text{п}} (1 - \beta)} \ln \beta;$$

$$n_{\delta} = \frac{[\beta + (1 - \beta) \gamma_{\text{п}}] \beta}{(1 - \beta) [1 - (1 - \beta) \gamma_{\text{п}}]} + \frac{1 - 2\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{п}} (1 - \gamma_{\text{п}})} \times \\ \times \left(\frac{\beta}{1 - \beta} \right)^2 \ln \frac{1 - (1 - \beta)}{\beta} + \frac{1 - \gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{п}}} \left(\frac{\beta}{1 - \beta} \right)^2 \ln \beta.$$

При использовании пропитывающих веществ с $\varepsilon_{\text{ж}}/\varepsilon_0 < 4$ расчетные данные, полученные с помощью (2-15), имеют по сравнению с (2-1) лучшее совпадение с опытными данными. При $\varepsilon_{\text{ж}}/\varepsilon_0 > 4$ результаты расчетов по (2-1) и (2-15) практически одинаковы.

На рис. 2-3 приведены зависимости ε пропитанной бумаги от $\varepsilon_{\text{ж}}$, рассчитанные по (2-15). Из рисунка видно, что наибольший темп роста ε пропитанной бумаги наблюдается при $\varepsilon_{\text{ж}} < \varepsilon_{\text{к}}$. При $\varepsilon_{\text{ж}} > \varepsilon_{\text{к}}$ этот рост существенно замедляется, особенно с повышением плотности бумаги.

Вопрос совпадения расчетных и опытных данных для $\operatorname{tg} \delta$ является более сложным, чем для ε . Для точного расчета ε пропитанной бумаги достаточно точно опреде-

лить диэлектрическую проницаемость отдельных компонентов диэлектрика и их соотношения. При расчете $\operatorname{tg} \delta$ необходимо учитывать также другие факторы, способные оказать на него существенное влияние. К таким факторам прежде всего относятся влага и воздух, которые могут в различных количествах оставаться в бумажном диэлектрике после термовакуумной обработки, а также ионные примеси пропитывающего диэлектрика. С ростом остаточного содержания влаги растет $\operatorname{tg} \delta$ и его зависимость от температуры. Особенно это заметно при пропитке полярными диэлектриками. Остаточный воздух приводит к повышению $\operatorname{tg} \delta$ бумажного диэлектрика при изменении напряжения начиная с напряжения возникновения критических частичных разрядов.

При наличии в пропитывающей жидкости ионных примесей наблюдается аномальное возрастание $\operatorname{tg} \delta$ с уменьшением напряжения в области небольших напряженностей, особенно при повышенной температуре и низкой частоте. Возрастание $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ при снижении напряжения обусловлено колебательным движением ионов в пропитывающем диэлектрике, заполняющем зазоры между слоями бумаги, а также между бумагой и обкладками. С ростом напряжения увеличивается амплитуда колебания ионов, что приводит к росту активной составляющей тока I_a . При некотором напряжении амплитуда колебания ионов достигает значения, равного толщине зазора, в результате чего дальнейшее возрастание I_a с ростом напряжения прекращается. В то же время реактивная (емкостная) составляющая тока I_p продолжает расти. В результате этого при дальнейшем росте напряжения отношение $I_a/I_p = \operatorname{tg} \delta$ начинает снижаться. Увеличение частоты ослабляет этот эффект, так как уменьшается путь, который успевают пройти ионы за каждый полупериод. Повышение температуры спо-

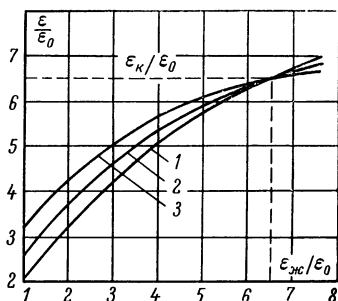


Рис. 2-3. Зависимость диэлектрической проницаемости пропитанной конденсаторной бумаги ϵ от диэлектрической проницаемости пропитывающего диэлектрика [расчет по (2-15) при $k=1$].

1 — $\gamma_6 = 8 \cdot 10^2$ кг/м³; 2 — $\gamma_6 = 10^3$ кг/м³; 3 — $\gamma_6 = 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³.

способствует усилению этого эффекта, так как при этом увеличивается количество ионов, движущихся в зазоре, т. е. растет проводимость.

Названные выше факторы не поддаются количественному описанию, и поэтому все формулы, полученные для расчета $\lg \delta$, применяются в основном для качественной оценки.

Для расчета электрической прочности $E_{\text{пр}}$ листа непропитанной и пропитанной бумаги, исходя из последовательной схемы (рис. 1-6), получена следующая формула [Л. 1-1]

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр.ж}}}{d} \left[1 + \frac{\beta \gamma_{\text{п}}}{1 - \gamma_{\text{п}}} \right], \quad (2-17)$$

где $U_{\text{пр.ж}}$ — пробивное напряжение вещества, заполняющего поры.

Эта формула получена из условия, что при повышении переменного напряжения пробой бумажного листа происходит последовательно в две стадии: сначала пробивается вещество, заполняющее поры; после этого все напряжение оказывается приложенным к слоям клетчатки, которые затем также пробиваются.

В (2-17) значение $U_{\text{пр.ж}}$ соответствует напряжению пробоя газовых или жидких прослоек толщиной несколько микрон. Для воздуха при $d = 7 \div 8$ мкм принимается $U_{\text{пр}} = 250$ В. Как показывают результаты проверки, для современных конденсаторных бумаг, особенно имеющих повышенную электрическую прочность, опытные и расчетные данные, полученные по (2-17), имеют значительные расхождения. Лучшее совпадение получается при расчете по формуле, предложенной в [Л. 2-8]:

$$E_{\text{пр}} = E_{\text{пр.к}} E_{\text{пр.ж}} / [E_{\text{пр.к}} + E_{\text{пр.ж}} (1 - \beta)], \quad (2-18)$$

где $E_{\text{пр.к}}$ — электрическая прочность клетчатки, МВ/м; $E_{\text{пр.ж}}$ — электрическая прочность вещества, заполняющего поры, МВ/м.

Для расчета электрической прочности пропитанной и непропитанной бумаги электрическая прочность клетчатки принимается равной $E_{\text{пр.к}} = 272$ МВ/м (действующее значение). Эта величина определена исходя из среднего значения электрической прочности бумаги, пропитанной конденсаторным маслом, при испытании постоянным напряжением. Электрическая прочность пропиты-

вающих диэлектриков при малых толщинах, включая и толщины, соответствующие размерам пор бумаги, приведена в [Л. 2-9]. Размер пор связан с плотностью бумаги. С увеличением плотности бумаги уменьшается размер пор и увеличивается толщина слоя клетчатки, что приводит к повышению электрической прочности листа.

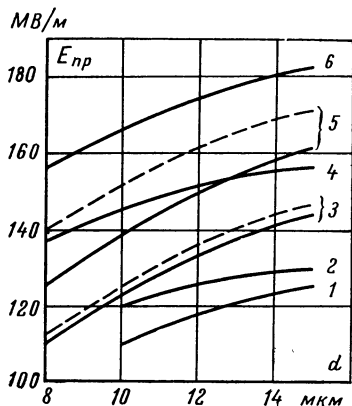


Рис. 2-4. Зависимость $E_{пр}$ конденсаторной бумаги от толщины листа.

1, 2 — $\gamma_6 = 8 \cdot 10^2$ кг/м³; 3, 4 — $\gamma_6 = 10^3$ кг/м³; 5, 6 — $\gamma_6 = 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³.
1, 3, 5 — пропитка трихлордифенилом (постоянное напряжение); 2, 4, 6 — пропитка нефтяным маслом;
— — — бумага Вольтам [Л. 2-11];
— бумага Терло, Терокс [Л. 2-10]. Испытания при $t = 25^\circ\text{C}$.

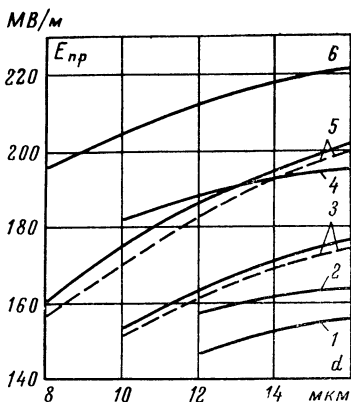


Рис. 2-5. То же, что и на рис. 2-4 для бумаг повышенной электрической прочности.

1, 2 — $\gamma_6 = 8 \cdot 10^2$ кг/м³; 3, 4 — $\gamma_6 = 10^3$ кг/м³; 5, 6 — $\gamma_6 = 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³.
— — — бумага Вольтам HV;
— бумага Терло HV, Терокс HV.

На электрическую прочность бумаги оказывает влияние ее структура, определяющая степень равномерности

распределения волокон клетчатки в листе. Современные конденсаторные бумаги повышенной электрической прочности отличаются от обычных бумаг главным образом лучшим размолотом целлюлозы и более равномерным распределением волокон целлюлозы в листе.

Из (2-17) и (2-18) следует, что с увеличением $\epsilon_{ж}$ электрическая прочность пропитанной бумаги должна возрастать, чего, однако, не наблюдается. Результаты испытаний пропитанной бумаги на электрическую прочность, приведенные на рис. 2-4—2-6, показывают, что электрическая прочность бумаги, пропитанной нефтяным маслом с $\epsilon_{ж}/\epsilon_0 = 2,2$, несколько выше, чем бумаги,

пропитанной хлордифенилом с $\epsilon_{ж}/\epsilon_0=5,8$ [Л. 2-10, 2-11].

Такой эффект можно объяснить зависимостью электрической прочности жидких диэлектриков от их диэлектрической проницаемости, которая в [Л. 2-12] определяется выражением:

$$\lg E_{пр} = -K\epsilon_{ж}/\epsilon_0 + C, \quad (2-19)$$

где $K=5,88 \cdot 10^{-2}$; C — постоянная, определяемая из опыта.

В результате совершенствования конденсаторной бумаги в СССР и за рубежом были найдены методы, позволяющие значительно улучшить характеристики целлюлозы и бумаги. Основной путь улучшения электрических характеристик бумаги состоит в повышении химической чистоты целлюлозы и сохранении ее в процессе производства бумаги [Л. 2-13].

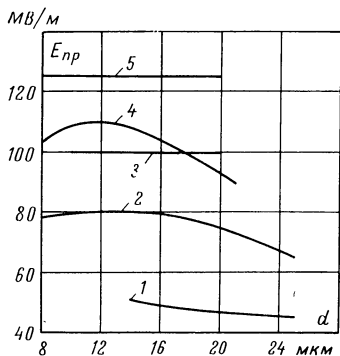


Рис. 2-6. То же, что и на рис. 2-4 для непропитанной конденсаторной бумаги Вольтам и Изолял [Л. 2-11].

1 — Изолял, $\gamma_6=8 \cdot 10^2$ кг/м³; 2 — Вольтам (и Изолял 12—25 мкм), $\gamma_6=10^3$ кг/м³; 3 — Вольтам HS, $\gamma_6=10^3$ кг/м³; 4 — Вольтам, $\gamma_6=1,2 \cdot 10^3$ кг/м³; 5 — Вольтам HS, $\gamma_6=1,2 \cdot 10^3$ кг/м³.

Выполненные в СССР исследования по изучению влияния органических и неорганических примесей в сульфатной целлюлозе и изготовленной из нее бумаге показали, что содержание низкомолекулярных углеводов (пентозанов) более 5—6% и наличие катионов одновалентных металлов вызывает резкое возрастание $\lg \delta$ [Л. 2-14—2-16]. Поэтому

для выработки конденсаторной бумаги улучшенного качества (по электрическим характеристикам) рекомендуется применять исходный материал с повышенным содержанием альфа-целлюлозы, с минимально возможным содержанием ионов, вредных примесей и полностью деионизированную воду. На основании этих рекомендаций бумажной промышленностью наряду с бумагой среднего качества производится ряд бумаг с улучшенными электрическими характеристиками. Так, наряду с бумагой плотностью $\gamma_6=(1 \div 1,25) 10^3$ кг/м³ освоено производство бумаги малой плотности $\gamma_6=(0,7 \div 0,8) 10^3$ кг/м³;

изготавливаются бумаги с малыми потерями, характеризующиеся значительно меньшей зависимостью $\operatorname{tg} \delta$ от температуры и меньшим его значением при 80—120°C; освоено производство бумаг с повышенной электрической прочностью.

Для силовых конденсаторов с пропиткой хлорированными жидкостями, которые более чувствительны к различного рода примесям по сравнению с нефтяным мас-

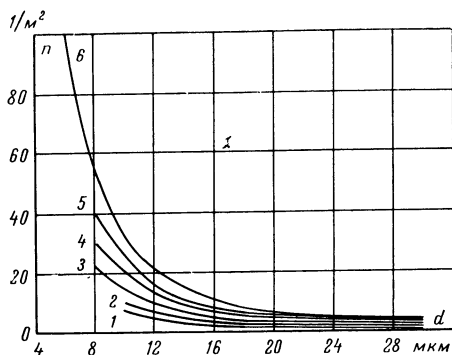


Рис. 2-7. Число токопроводящих включений на 1 м² финской конденсаторной бумаги в зависимости от толщины листа [Л. 2-10].

1, 2 — $\gamma_b = 8 \cdot 10^2$ кг/м³; 3, 4 — $\gamma_b = 10^3$ кг/м³; 5, 6 — $\gamma_b = 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³; 1, 3, 5 — Терал, Терло, Терокс; 2, 4, 6 — Теркон.

лом, выпускается оксидная конденсаторная бумага, содержащая активную окись алюминия (Al_2O_3) или другие сорбенты. Применение оксидной бумаги позволяет не только улучшить $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов, но и повысить срок их службы благодаря стабилизирующему действию сорбентов, способных связывать ионные примеси, попадающие в конденсаторы при изготовлении, а также образующиеся под действием электрического поля в процессе их эксплуатации.

На характеристики конденсаторной бумаги существенное влияние оказывают так называемые токопроводящие включения (ТПВ), число которых на 1 м² в отечественной бумаге нормируется в ГОСТ 1908-66, а в зарубежной бумаге — в фирменных каталогах. На рис. 2-7—2-9 и в табл. 2-1 приведена зависимость коли-

чества ТПВ от толщины конденсаторной бумаги различных изготовителей. Как следует из этих данных, с увеличением толщины и уменьшением плотности бумаги число ТПВ на 1 м^2 снижается. Снижения количества ТПВ можно добиться также применением более качественной целлюлозы, а также более качественной выработкой бумаги.

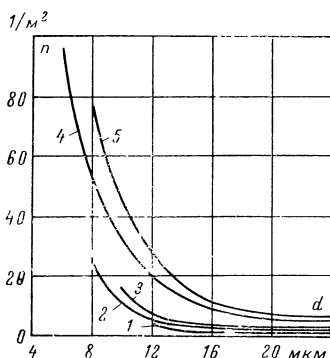


Рис. 2-8. То же, что и на рис. 2-7 для французской бумаги [Л. 2-11].

1 — Изолям, $\gamma_0 = 8 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$; 2 — Вольтам, Вольтам HS и Изолям, $\gamma_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$; 3 — Вольтек, $\gamma_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$; 4 — Вольтам, Вольтам HS, $\gamma_0 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; 5 — Вольтек, $\gamma_0 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

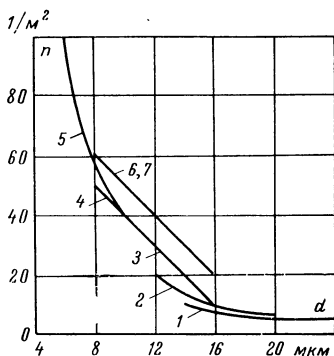


Рис. 2-9. То же, что и рис. 2-7 для японской бумаги [Л. 2-17]. 1 — SL, $\gamma_0 = (6,8 \div 7,5) 10^2 \text{ кг/м}^3$; 2 —

LLL, $\gamma_0 = 8,5 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$; 3 — LL, $\gamma_0 = 9,5 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$ (10—16 мм); 4 — L, $\gamma_0 = 1,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (8—16 мм); 5 — M, $\gamma_0 = (1,12 \div 1,15) 10^3 \text{ кг/м}^3$ (6—16 мм); 6 — H, $\gamma_0 = (1,18 \div 1,24) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ (8—16 мм); 7 — UN, $\gamma_0 = (1,24 \div 1,26) 10^3 \text{ кг/м}^3$ (10—16 мм).

В конденсаторных бумагах ТПВ представляют собой частицы металлов и их окислы, попадающие в бумагу в процессе ее изготовления. Определение количества ТПВ на 1 м^2 бумаги производится на специальных аппаратах при пропускании бумаги между двумя электродами. Согласно ГОСТ 1908-66 аппараты для определения ТПВ должны регистрировать включения сопротивлением от $2 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ и ниже. Аппараты, применяемые фирмами «Тервакоски» (Финляндия) и «Боллоре» (Франция), регистрируют ТПВ с сопротивлением от 10^6 Ом и ниже. Результаты измерения сопротивлений ТПВ (обнаруженных прибором с чувствительностью до $2 \cdot 10^5 \text{ Ом}$) конденсаторных бумаг отечественного и зарубежного производства показывают, что при влажности бумаги около 6—8%

сопротивление большинства ТПВ составляет 10^4 — 10^5 Ом и лишь незначительная часть имеет сопротивление около 10^3 Ом и выше 10^5 Ом. После сушки и пропитки бумаги сопротивление большинства ТПВ возрастает до одного порядка. Наличие ТПВ и их совпадение в слоистом бумажном диэлектрике приводит к снижению как кратковременной электрической прочности диэлектрика, так и срока службы конденсаторов вследствие повышения напряженности электрического поля в местах их расположения.

В табл. 2-1 приведены характеристики $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторных бумаг отечественного и зарубежного производства. Бумаги улучшенного качества — отечественная малопотерная, финские Терло и Терокс, французские Вольтам и Изолям — имеют значительно более низкий $\operatorname{tg} \delta$ и меньшую его зависимость от температуры по сравнению с бумагами марок КОН, Теркон и Вольтек. Из всех приведенных бумаг наименьший $\operatorname{tg} \delta$ и наименьшую его зависимость от температуры имеют финские бумаги улучшенного качества Терло, Терокс и французские Вольтам и Изолям. Японские конденсаторные бумаги по $\operatorname{tg} \delta$ лучше обычных отечественных бумаг КОН, финской Теркон и французской Вольтек, однако они значительно уступают названным выше бумагам улучшенного качества. Применение бумаги с малым значением $\operatorname{tg} \delta$ и небольшой его зависимостью от температуры позволяет повышать мощность в единице объема и улучшать термостабильность конденсаторов.

На рис. 2-4—2-6 представлены зависимости электрической прочности $E_{\text{пр}}$ конденсаторных бумаг различных марок от толщины листа. Электрическая прочность бумаги Терло HV, Терокс HV и Вольтам HS примерно на 20—25% выше прочности бумаги Терло, Терокс и Вольтам. Бумаги с повышенной электрической прочностью сортов HV и HS позволяют без снижения надежности работы изоляции применять их при меньшем по сравнению с бумагами обычной прочности числе листов между обкладками. Применение такой бумаги в два листа между обкладками позволило ряду изготовителей значительно повысить удельные характеристики конденсаторов низкого напряжения.

В последнее время большое внимание уделяется созданию устойчивой к старению бумаги с использованием сочетания различного рода катионов для нейтрализации

Таблица 2-1

Характеристика конденсаторной бумаги

Марка бумаги	Плотность, $\times 10^3$ кг/м ³	Толщина, мкм	Количество токопрово- дящих включений на 1 м ²	Электрическая проч- ность непровитанной бумаги, МВ/м	Тангенс угла диэлектри- ческих потерь, %			
					Непровитанная при t , °С		Провитанная ТХД при t , °С	
					100	120	100	120
КОН	1	7—30	600—10	43—20	0,28	0,4	0,35	0,6
	1,2	5—30	1600—20	52—21	0,35	—	—	—
Силкон	0,8	12—15	20—10	—	0,1	—	—	—
	1	7—30	200—3	46—21	0,15	0,21	0,3	0,37
	1,2	5—30	400—5	60—23	0,2	—	—	—
МКОН	1	10—15	30—10	—	0,16	0,21	0,27	0,3
Теркон	0,8	10—30	10—3	—	0,18	0,22	0,3	0,47
	1	8—30	30—4	—	0,18	0,3	0,35	0,57
	1,2	6—30	100—5	—	0,23	0,37	0,4	0,67
Терло	0,8	10—30	7—1	—	0,085	0,105	0,2	0,22
	1	8—30	22—2	—	0,13	0,15	0,24	0,26
	1,2	7,5—30	40—3	—	0,175	0,2	0,28	0,31
Терокс	1,2	7,5—30	40—3	—	0,175	0,2	0,29	0,32
S	SL0,75	14—25	10—5	56—54	—	—	0,23	0,28
	L1,05	8—16	50—10	88—74	—	—	0,39	0,4
	M1,15	8—16	60—10	100	—	—	0,38	0,49
LO	SL0,75	14—25	10—5	56—54	—	—	0,215	0,26
	L0,105	10—16	40—10	75—66	—	—	0,28	0,33
	M1,15	6—16	100—100	95—80	—	—	0,36	0,41
ALO	SL0,75	14—25	10—5	50—48	—	—	0,19	0,25
	L0,95	10—16	40—10	—	—	—	0,27	0,33
	M1,15	6—16	100—10	—	—	—	0,33	0,41
Воль- тек	0,8	—	—	—	—	—	—	—
	1	10—30	15—3	—	0,17	0,23	0,3	0,38
	1,2	8—30	75—5	—	0,22	0,27	0,36	0,42
Воль- там	0,8	12—15	—	38—27	—	—	—	—
	1	8—30	24—2	50—28	0,14	0,17	0,26	0,29
	1,2	5—30	120—5	63—29	0,18	0,23	0,31	0,34
Изолям	0,8	15—25	2,4—04	—	0,1	0,12	0,20	0,24
	1	12—20	5—2	—	0,13	0,15	0,25	0,28
	1,2	—	—	—	0,18	0,22	0,29	0,32

Примечания. 1. Бумага КОН, Силкон — по ГОСТ 1908-66, МКОН по ТУ 81-04-194-72.

2. Бумага Теркон, Терло и Терокс фирмы „Тервакоски“ [Л. 2-10].

3. Бумага Вольтек, Вольтам и Изолям фирмы „Боллоре“ [Л. 2-11].

4. Бумага марок S, LO и ALO фирмы „Хонсю-папер“ [Л. 2-17].

целлюлозы. Так, конденсаторная бумага Натрон VP-600 (ФРГ), являющаяся химически нейтральной, с высоким содержанием альфа-целлюлозы, отличается от обычных бумаг с малыми потерями наличием в ней особых нейтрализационных катионов, повышающих устойчивость к старению [Л. 2-18]. Бумага Натрон VPO имеет все преимущества бумаги Натрон VP-600, но еще имеет добавку алюминоксида 1,5%, способного поглощать ионные примеси и в еще большей степени повышать устойчивость бумаги к старению.

2-2. СИНТЕТИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ И БУМАЖНО-ПЛЕНОЧНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК

Исследования по снижению потерь в конденсаторной бумаге, проводившиеся с 1960 г., не дали существенных положительных результатов, и поэтому работы, связанные с дальнейшим совершенствованием силовых конденсаторов, были направлены на изучение бумажно-плёночного диэлектрика [Л. 2-19]. Полимерные пленки сравнительно давно использовались в качестве основного твердого диэлектрика в различных видах конденсаторов. Неполлярные пленки, имеющие малую относительную диэлектрическую проницаемость ($2-2,7$), низкий $\operatorname{tg} \delta$ ($5 \div 10$) 10^{-4} , высокое удельное сопротивление (до 10^{20} Ом·см), независимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ от частоты, отрицательный ТК ϵ , применяются в основном для конденсаторов высокой частоты с повышенной стабильностью емкости и большой постоянной времени. Полярные пленки с характерными для них повышенными значениями ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ и зависимостью этих характеристик от частоты переменного тока в ряде случаев полностью заменили бумагу в конденсаторах постоянного тока. Конденсаторы с непропитанным пленочным диэлектриком находят применение только при низких напряжениях, не превышающих несколько сотен вольт. Изготовление пленочных конденсаторов без заполнения пропитывающим диэлектриком на более высокое напряжение ограничивается напряженностью возникновения частичных разрядов (ЧР) [Л. 1-2, 2-20].

В силовых конденсаторах переменного напряжения повышенной частоты используется полистирольная пленка в сочетании с нефтяным маслом, содержащим в основном нафтеновые углеводороды. Вследствие низкого зна-

чения $\operatorname{tg} \delta$ полистирола в ряде случаев можно отказаться от водяного охлаждения. Несмотря на сравнительно низкую цену (близкую к цене бумаги) и высокие электроизоляционные свойства, полистирольная пленка имеет ограниченное применение в силовом конденсаторостроении из-за низкой теплостойкости (рабочая температура не превышает 70°C) и несовместимости с более газостойкими пропитывающими диэлектриками — хлордифенилом и ароматизированными маслами.

Из известных полимерных пленок для силовых конденсаторов переменного напряжения наиболее подходящей и перспективной оказалась полипропиленовая изотактическая пленка с регулярным строением молекулярных цепей и высоким содержанием кристаллической структуры. Эта пленка имеет сравнительно высокие электрические и механические характеристики, обладает достаточной термостойкостью (температура плавления около 170°C) и химической стойкостью, совместима с хлордифенилами и ароматизированными маслами. Плотность пленки невелика — около $9 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$. При частоте 50 Гц $\epsilon/\epsilon_0 = 2,2 \div 2,3$ и $\operatorname{tg} \delta = (2 \div 3) 10^{-4}$, удельное поверхностное электрическое сопротивление $\rho_s = 2 \times 10^{16} \text{ Ом}$, удельное объемное электрическое сопротивление $\rho_v = 7 \cdot 10^{17} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Электрическая прочность итальянской пленки по итальянским данным при толщине 25 мкм и 50 Гц при $t = 50 \div 80^{\circ}\text{C}$ равна 180—190 МВ/м; по американским данным для американской пленки $E_{\text{пр}} = 380 \text{ МВ/м}$, а для итальянской пленки толщиной 5, 10 мкм $E_{\text{пр}} = 314 \text{ МВ/м}$ [Л. 2-19].

В современных силовых конденсаторах на переменное напряжение частоты 50 Гц полипропиленовая пленка используется в комбинации с конденсаторной бумагой, имеющей малые потери, и хлорированным дифенилом. В этом случае бумага, помещаемая между пленками, применяется как пористый диэлектрик, выполняющий одновременно роль фитиля, втягивающего пропитывающую жидкость в поры и межслойное пространство, что повышает электрическую прочность и напряженность частичных разрядов комбинированного диэлектрика. В пространство между пленками и обкладками пропитка проникает достаточно хорошо благодаря хорошей смачиваемости алюминиевых обкладок.

Используя схему замещения рис. 1-6, можно получить формулы для расчета диэлектрической проницаемо-

сти ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ комбинированного диэлектрика. На основании этой схемы емкость $C = \epsilon S/d$, образуемая комбинированным диэлектриком, может быть представлена как последовательное соединение трех емкостей $C_K = \epsilon_K S/d_K$; $C_{\Pi} = \epsilon_{\Pi} S/d_{\Pi}$ и $C_{Ж} = \epsilon_{Ж} S/d_{Ж}$, образуемых слоями соответственно клетчатки, пленки и жидкости. Эквивалентная емкость последовательного соединения трех емкостей равна:

$$C = C_K C_{\Pi} C_{Ж} / (C_{\Pi} C_{Ж} + C_K C_{Ж} + C_K C_{\Pi}). \quad (2-20)$$

Подставим в (2-20) вместо C_K , C_{Π} и $C_{Ж}$ их значения и используем условия:

$$d_{\Pi} = n' d'_1; \quad d_K = nd_1 \gamma_6 / \gamma_K \quad \text{и} \quad d_{Ж} = \left(1 - \frac{k \gamma_6}{\gamma_K}\right) \frac{nd_1}{k} + \\ + \frac{1-k}{k} n' d'_1;$$

после преобразований и замены отношений $nd_1/(nd_1 + n' d'_1) = \kappa$ и $n' d'_1/(nd_1 + n' d'_1) = 1 - \kappa$ (κ — доля бумаги в общей толщине твердого диэлектрика) получим:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{Ж}}{1 - k \left\{ 1 - \frac{\epsilon_{Ж}}{\epsilon_{\Pi}} - \kappa \left[\frac{\gamma_6}{\gamma_K} (1 - \beta) - \left(1 - \frac{\epsilon_{Ж}}{\epsilon_{\Pi}}\right) \right] \right\}}. \quad (2-21)$$

Частными случаями (2-21) является (2-1) для расчета ϵ пропитанной бумаги при $\kappa = 1$ и формула для расчета ϵ чисто пленочного диэлектрика с жидким наполнителем при $\kappa = 0$.

В диэлектрике с потерями при последовательной схеме замещения имеет место соотношение [Л. 2-21]: $\operatorname{tg} \delta = r \omega C$, где r — эквивалентное сопротивление потерь; C — емкость; ω — угловая частота. Применяя это соотношение к каждому из слоев схемы (рис. 1-6), получаем выражения для сопротивлений потерь соответствующего слоя:

$$r_K = \operatorname{tg} \delta_K / \omega C_K; \\ r_{\Pi} = \operatorname{tg} \delta_{\Pi} / \omega C_{\Pi}; \quad r_{Ж} = \operatorname{tg} \delta_{Ж} / \omega C_{Ж}.$$

Эквивалентное сопротивление потерь диэлектрика в целом равно $r = \operatorname{tg} \delta / \omega C$, где $\operatorname{tg} \delta$ — эквивалентный тангенс угла потерь, C — эквивалентная емкость. Параметр r есть сумма частичных сопротивлений потерь компонентов

$$\operatorname{tg} \delta / \omega C = \operatorname{tg} \delta_K / \omega C_K + \\ + \operatorname{tg} \delta_{\Pi} / \omega C_{\Pi} + \operatorname{tg} \delta_{Ж} / \omega C_{Ж}. \quad (2-22)$$

Произведя в (2-22) подстановки и преобразования, аналогичные применявшимся при выводе (2-21), получим выражение для $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{k\kappa^2 \frac{\gamma_6}{\gamma_k} \operatorname{tg} \delta_k + (1 - \kappa) \frac{\epsilon_{ж}}{\epsilon_n} \operatorname{tg} \delta_n +}{1 - k \left\{ \left(1 - \frac{\epsilon_{ж}}{\epsilon_n} \right) - \right.} \rightarrow$$

$$\left. + \left[\frac{1 - k}{k} + \kappa \left(1 - \frac{\gamma_6}{\gamma_k} \right) \right] \operatorname{tg} \delta_{ж} \right.} \rightarrow \frac{\left. - \kappa \left[\frac{\gamma_6}{\gamma_k} (1 - \beta) - \left(1 - \frac{\epsilon_{ж}}{\epsilon_n} \right) \right] \right\}}. \quad (2-23)$$

Из (2-23) как частные случаи следуют формулы для расчета $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика из пропитанной бумаги [при $\kappa=1$ формула (2-2)] и чисто пленочного диэлектрика ($\kappa=0$).

На рис. 2-10 приведена зависимость $\epsilon/\epsilon_k = f(\kappa)$, рассчитанная по (2-21) при $\epsilon_k/\epsilon_0=6,5$, $\epsilon_n/\epsilon_0=2,3$ и диэлектрической проницаемости пропитанной трихлордифенилом бумаги $\epsilon/\epsilon_0=6$.

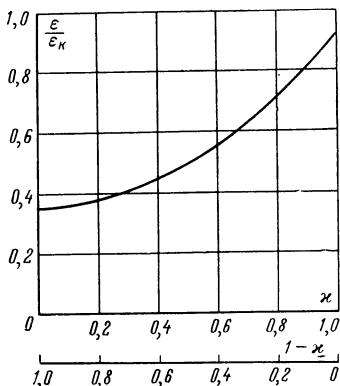


Рис. 2-10. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости бумажно-полипропиленового диэлектрика от доли бумаги при пропитке трихлордифенилом.

Из [Л. 2-22] известно, что полипропиленовая пленка хорошо совместима с хлордифенилом, тем не менее наблюдается некоторое взаимодействие пленки с этой пропитывающей жидкостью. При 20°C растворимость полипропиленовой пленки в хлордифениле ограничена. При температуре выше 80°C в хлордифениле растворяется аморфная часть полипропилена, поэтому при изготовлении конденсаторов происходит повышение $\operatorname{tg} \delta$ хлордифенила, а следовательно, и конденсаторов. Однако в процессе работы конденсаторов их $\operatorname{tg} \delta$ снижается. Для

уменьшения влияния растворенного полипропилена на $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора рекомендуется проводить более тщательную очистку исходного полимера от ионных приме-

сей, а также увеличивать число поперечных связей облучением. При использовании пленок с незначительным количеством ионных примесей $\text{tg } \delta$ может оставаться неизменным при длительной работе конденсаторов. Согласно [Л. 2-22] при 90°C за 6—20 дней в трихлордифениле растворяется 1% (массы) пленки; в то же время 11% трихлордифенила поглощается пленкой, т. е. происходит ее «пропитка».

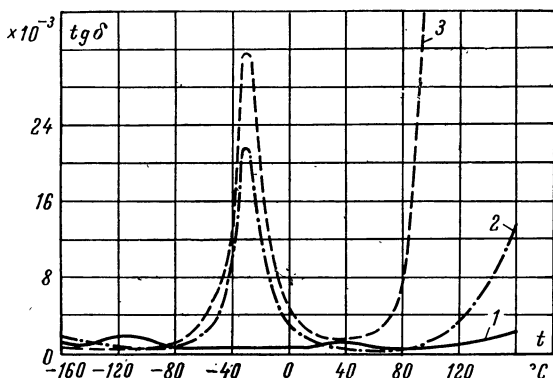


Рис. 2-11. Влияние трихлордифенила на $\text{tg } \delta$ полипропиленовой пленки.

1 — исходная; 2 — после выдержки в трихлордифениле 144 ч при 100°C ; 3 — то же 2 ч при 140°C .

Влияние трихлордифенила на полипропиленовую пленку может быть проиллюстрировано рис. 2-11 [Л. 2-23], где кривой 1 представлена зависимость $\text{tg } \delta$ пленки от температуры до контактирования ее с трихлордифенилом, кривой 2 — после контактирования в течение 144 ч при 100°C и кривой 3 — в течение 2 ч при 140°C . Как видно из этого рисунка, после контактирования пленки с трихлордифенилом в температурной зависимости $\text{tg } \delta$ пленки появляется дипольный максимум при температуре, соответствующей дипольному максимуму трихлордифенила.

С повышением температуры контактирования этот максимум возрастает. Набухание пленки зависит от температуры и времени выдержки ее в трихлордифениле. Процесс набухания тонких пленок происходит очень быстро. Пленка толщиной 12 мкм при 100°C набухает за время меньше 1 мин [Л. 2-24]. Набухшая пленка имеет

более высокую электрическую прочность и диэлектрическую проницаемость по сравнению с исходной.

Отличительными свойствами пленочного, а следовательно, и бумажно-пленочного диэлектрика по сравнению с бумажным является значительно более высокая электрическая прочность, особенно при малых толщинах. Это позволяет применять в конденсаторах меньшую толщину изоляции между обкладками, одновременно повышая электрическую прочность, напряженность ЧР. Благодаря высокой электрической прочности полипропиленовой пленки, низкому $\operatorname{tg} \delta$ и высокой напряженности ЧР тонкослойного бумажно-пленочного диэлектрика представляется возможным принимать в таком диэлектрике по сравнению с бумажным более высокую рабочую напряженность электрического поля и получать примерно в 1,5 раза выше удельные характеристики конденсаторов.

2.3. ПРОПИТЫВАЮЩИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Пропитывающие диэлектрики являются одним из основных компонентов конденсаторного диэлектрика, в значительной мере определяющих технические и экономические характеристики конденсаторов. Для силовых конденсаторов в качестве пропитывающего диэлектрика применяются главным образом нефтяное конденсаторное масло, хлорированные дифенилы и смеси хлордифенилов между собой и с другими хлорированными углеводородами. Для некоторых видов конденсаторов также используется касторовое масло и кремнийорганические (полиорганосилоксановые) соединения. По сравнению с нефтяным конденсаторным маслом хлордифенилы и их смеси имеют ряд преимуществ, которые позволили значительно улучшить технико-экономические и качественные характеристики конденсаторов.

Основным достоинством хлордифенилов являются:

- а) высокая диэлектрическая проницаемость, приближающаяся к диэлектрической проницаемости клетчатки, что приводит к выравниванию напряженности электрического поля в клетчатке и пропитывающем диэлектрике;
- б) химическая стойкость и стойкость к воздействию частичных разрядов; последнее позволяет улучшить удельные характеристики конденсаторов за счет повышения рабочей напряженности электрического поля в диэлек-

36

трике, не снижая при этом надежности и срока службы; в) их негорючесть, что упрощает эксплуатацию конденсаторов, не требуя принятия специальных противопожарных мер.

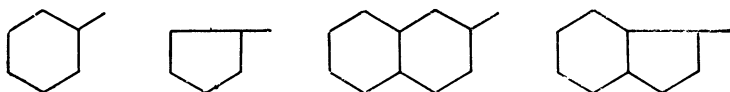
Однако наряду с указанными достоинствами эти жидкости имеют и существенные недостатки, препятствующие их конкуренции с конденсаторным маслом. К ним относится повышенная вязкость, особенно при низких температурах, в результате чего эти жидкости применяются в менее широком по сравнению с нефтяным маслом диапазоне отрицательных температур. С увеличением вязкости при низких температурах резко снижается диэлектрическая проницаемость этих жидкостей и замедляется поглощение газообразных продуктов разложения жидкости из зоны действия ЧР. К недостаткам следует также отнести и большую чувствительность этих жидкостей к различного рода примесям, влияющим на их электрические характеристики, а также токсичность, что существенно усложняет технологию производства конденсаторов. Несмотря на значительные преимущества, хлордифенилы в ряде случаев не могут пока полностью заменить нефтяное масло и особенно там, где требуется работа в широком интервале отрицательных температур при повышенной частоте переменного тока. Поэтому нефтяное масло продолжают применять в качестве пропитывающего диэлектрика в силовом конденсаторостроении.

Нефтяное конденсаторное масло. Как известно, до 1930 г. в трансформаторах, кабелях и конденсаторах в качестве электроизоляционной пропитывающей жидкости применялось только нефтяное масло. Уже в тот период было обнаружено, что конденсаторы и кабели, пропитанные высокоочищенным маслом, выходят из строя чаще, чем те, которые пропитаны менее очищенными маслами, содержащими большой процент ароматических углеводов. При анализе этого явления было установлено, что причиной более частого выхода конденсаторов из строя после сравнительно небольшого их срока службы являются внутренние частичные разряды, которые имеют более интенсивное развитие в изоляции, пропитанной высокоочищенными маслами вследствие большего выделения газов при их разложении.

Многочисленные исследования нефтяных масел показали, что масла с повышенным содержанием ароматиче-

ских углеводов имеют меньшую склонность к выделению газов (в основном водорода) при воздействии на них электрических разрядов и обладают большей способностью к их поглощению. Такие масла условно были названы «газостойкими». Масла с небольшим количеством ароматических углеводов, которые в результате непродолжительного действия разрядов выделяют газы, называются «негазостойкими».

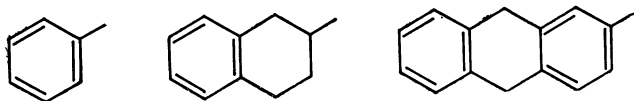
Электроизоляционные нефтяные масла, к которым относится и конденсаторное масло, представляют собой сложную смесь углеводов парафинового, нафтенового, ароматического и нафтенно-ароматического рядов, а также кислородных, сернистых и азотосодержащих производных этих углеводов. Одним из основных компонентов в содержании нефтяных масел являются нафтеновые углеводороды, количество которых составляет 70—85% и в редких случаях 50—60%. Нафтеновые углеводороды имеют пяти- или шестичленную моно- и полициклическую структуру с прямыми или разветвленными боковыми цепями. Молекулы нафтеновых углеводов имеют следующий общий вид:



Обычно количество атомов, составляющих нафтеновые циклы углеводорода, не превышает 6, 10, 14 (одно- и трехкольчатые углеводороды), при этом в боковые цепи входят 20—25 атомов и более углеводорода. Такое строение нафтеновых углеводов ближе соответствует нафтенно-парафиновым углеводородам.

Вторым основным компонентом нефтяных масел являются ароматические углеводороды, содержание которых составляет 10—40%. По своему строению ароматические углеводороды являются моно- и полициклическими системами, содержащими одно или несколько ароматических колец. Часть ароматических углеводов, кроме ароматических колец, содержит в молекуле также нафтеновые кольца, и поэтому их относят к нафтенно-ароматическим углеводородам. Как ароматические, так и нафтенно-ароматические углеводороды имеют

парафиновые боковые цепи. Молекулы ароматических углеводородов имеют следующий общий вид:



От количества и строения боковых цепей зависят свойства ароматических углеводородов, например вязкостно-температурные характеристики, стойкость к окислению, газостойкость и пр.

Ароматические углеводороды являются необходимой составной частью электроизоляционных конденсаторных масел, так как их структурный и количественный состав во многом определяет физико-химические и электрические характеристики масел. Полное удаление ароматических углеводородов из масла в процессе очистки приводит к снижению стойкости масла против окисления (особенно при повышенной температуре), каталитического воздействия металлов, света и повышению склонности к газовыделению при действии электрических разрядов. Излишнее количество ароматических углеводородов, особенно полициклических, ухудшает $tg\delta$ масел. Поэтому при производстве масел добиваются получения для каждого типа масла оптимального соотношения нафтеновых и ароматических углеводородов.

Особо важной характеристикой пропитывающих диэлектриков является их газостойкость. Испытание нефтяных масел на газостойкость обычно производят в приборах типа Пирелли, Руммеля и пр. [Л. 2-25, 2-26], где получают разряды на границе раздела жидкость — газ. В качестве газовой среды в большинстве случаев применяется водород или воздух, газостойкость масел в большинстве случаев оценивается или коэффициентом K , выражаемым отношением объема выделившегося, а также поглощенного газа V_r ко времени испытаний τ , т. е. $K = V_r/\tau$, или просто его объемом ($см^3$) за время испытания. В [Л. 2-27, 2-28] рекомендуется производить оценку газостойкости масел (при их испытании по указанной методике) коэффициентом B , определяющим количество выделившихся из масла газов при энергии в 1 Дж, и предельной поглощаемостью газов в 1 $см^3$ масла. Коэффициент B зависит от химического состава

масла, температуры и колеблется в пределах 10^{-4} — 10^{-3} см³/Дж. Эти методы широко используются для сравнительной оценки газостойкости масел, и их результаты согласуются с результатами испытания конденсаторов на срок службы, т. е. чем выше газостойкость масел, тем больше срок службы.

Таблица 2-2

Состав масла из туймазинской нефти

Наименование углеводородов (УВ)	Содержание УВ, %	Вязкость $\times 10^{-6}$ м ² /с	Содержание серы, %	Тангенс угла диэлектрических потерь, %, при температуре, °С			Газостойкость, отн. ед.
				50	70	100	
Исходное масло	100	8,47	0,52	0,11	0,25	0,94	16
Нафтеновые	73	7,68	—	0,02	0,05	0,15	1
Легкая ароматика	9	9,39	0,47	0,02	0,15	0,21	29
Средняя ароматика	11,0	12,1	1,32	0,08	0,2	1,18	306
Тяжелая ароматика	5,8	16,17	5,13	2,18	5,4	19,2	55

Примечание. Газостойкость определялась по времени газопоглощения при 20°С и $E=7$ МВ/м в среде воздуха.

В табл. 2-2 приведены результаты измерения некоторых основных характеристик масла туймазинской нефти с температурой застывания —46°С и углеводородов, выделенных из этого масла. Как видно из табл. 2-2, из всего состава углеводородов наименьшей газостойкостью обладают нафтеновые углеводороды.

Наибольшую газостойкость имеют средние ароматические углеводороды. Разные группы ароматических углеводородов имеют существенное различие в газостойкости, что, по-видимому, объясняется различным строением молекул [Л. 2-29].

В СССР для силового конденсаторостроения разработан ряд газостойких конденсаторных масел (из восточных сернистых нефтей) с температурой застывания —45°С для конденсаторов умеренного климата и —56°С для конденсаторов северных районов страны.

Групповой химический состав, физико-химические и электрические характеристики этих масел приведены в табл. 2-3. Как видно из табл. 2-3, более высокое содержание ароматических углеводородов (более 70%) имеют масла № 3 и 4. В масле № 2 содержание ароматических углеводородов составляет немногим более 30%. Это масло в значительной мере уступает указан-

Таблица 2-3

Характеристики нефтяных масел

Характеристика	Конденсаторные масла			
	№ 1	№ 3	№ 2	№ 4
Плотность, 10^3 кг/м^3	0,866	0,9011	0,86	0,89
Вязкость при 50°C , $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	11,7	10,6	9,8	10,9
Температура вспышки, $^\circ\text{C}$	160	162	158	170
Температура застывания, $^\circ\text{C}$	—45	—48	—45	—56
Кислотное число, мг КОН/г	0,12	0,006	0,005	0,008
Содержание серы, %	—	1,55	0,73	0,73
Нафтеновые УВ, %	81	26	68,7	25,1
Легкая ароматика, %	2	12,7	5,1	24,6
Средняя ароматика, %	8,6	31	13,9	21,8
Тяжелая ароматика, %	8,3	30	11,5	27,7
Смоли, %	0,1	0,3	0,83	0,8
Газостойкость по объему поглощенного газа, см^3 , при:				
20°C	0,45	10,2	3,78	—
70°C	0,36	11,9	2,34	—
90°C	0,29	8,3	1,41	—
Газостойкость по относительному объему поглощенного газа, %, при:				
20°C	3,7	85	25	—
70°C	3	100	19	—
90°C	2,4	70	12	—
Газостойкость по скорости поглощения маслом газа, $\text{см}^3/\text{ч}$, при:				
20°C	1,58	0,226	0,11	—
70°C	1,26	0,476	0,094	—
90°C	1,06	0,332	0,095	—
Электрическая прочность, МВ/м	24	24	24	24
ϵ/ϵ_0 при 20°C	2,2	2,26	2,3	2,35
$\text{tg } \delta$ при 100°C , %	0,02	0,15	0,04	0,08

Примечание. № 1—стандартное масло по ГОСТ 5775-51; № 2—то же по ГОСТ 5775-68; № 3—ароматизированное масло для умеренного климата; № 4—то же для северных районов.

ным высокоароматизированным маслам по стойкости к газовыделению при электрических разрядах, хотя по диэлектрической проницаемости и удельному объемному сопротивлению ρ_v мало чем от них отличается. Основные характеристики и результаты исследования этих масел на газостойкость приведены в табл. 2-3 и на рис. 2-12 и 2-13.

В табл. 2-3 приведены значения абсолютного и относительного объема газа, поглощенного маслами в процессе их испытаний на газостойкость и скорость их по-

глощения. Абсолютный объем, см^3 (за все время поглощения), равен:

$$V_r = V_0(1 - P_1/P); \quad (2-24)$$

относительный объем, %, равен:

$$V_{\text{отн}} = V_r/V_m 100; \quad (2-25)$$

скорость поглощения, $\text{см}^3/\text{ч}$, определим из соотношения

$$S = V_r/\tau, \quad (2-26)$$

где V_r — объем поглощенного маслом газа, см^3 ; V_0 — объем испытательной камеры прибора, заполненной газом, см^3 ($V_0 = 18 \text{ см}^3$); P — начальное давление в испытательной камере прибора, Па; P_1 — конечное давление,

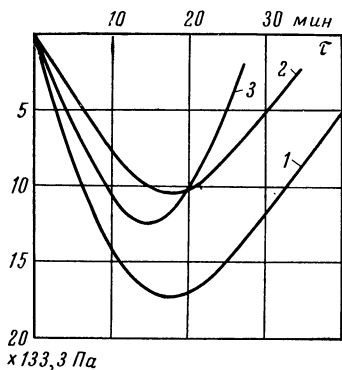


Рис. 2-12. Газостойкость масла № 1 при испытании в среде воздуха.

1 — 20°C; 2 — 90°C; 3 — 70°C.

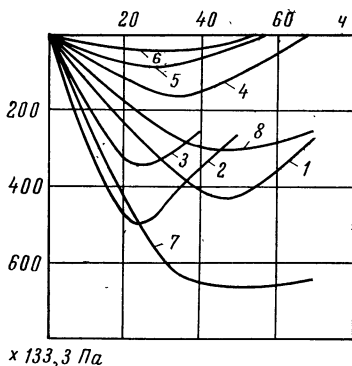


Рис. 2-13. Газостойкость разных масел и фторкремнийорганической жидкости (ФСТ-5) при испытании в среде воздуха.

1—3 — масло № 3; 4—6 — масло № 2; 7 — касторовое масло; 8 — ФСТ-5; 1, 4 — 20°C; 2, 5, 7, 8 — 70°C; 3, 6 — 90°C.

Па; V_m — объем испытуемого масла, см^3 ($V_m = 12 \text{ см}^3$); τ — время поглощения, ч. Как следует из табл. 2-3, объем

газа, поглощаемый высокоароматизированным маслом № 3, в десятки раз выше объема, поглощаемого стандартным маслом, и в несколько раз выше объема, поглощаемого маслом № 2. Однако скорость поглощения выше у стандартного масла.

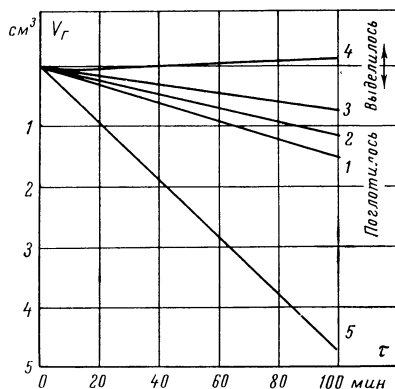
Скорость поглощения является важной характеристикой масел, так как она определяет изменение интенсивности частичных разрядов в бумажно-масляных конденса-

саторах. С повышением скорости газопоглощения, при всех других равных условиях, следует ожидать снижения скорости развития частичных разрядов. Тем не менее оценивать газостойкость масел только по скорости газопоглощения (по коэффициенту газостойкости) недостаточно, необходимо также учитывать и относительное объемное количество поглощаемых газов.

Результаты исследования масел на газостойкость показывают, что низкоароматизированное стандартное масло № 1 имеет высокую скорость, но очень малое время газопоглощения (всего 15—17 мин) и малый объем

Рис. 2-14. Газостойкость масел и хлордифенила при испытании в среде водорода при 40°C.

1 — масло № 3; 2 — масло № 4;
3 — масло № 2; 4 — масло № 1;
5 — трихлордифенил (по данным БТИ).

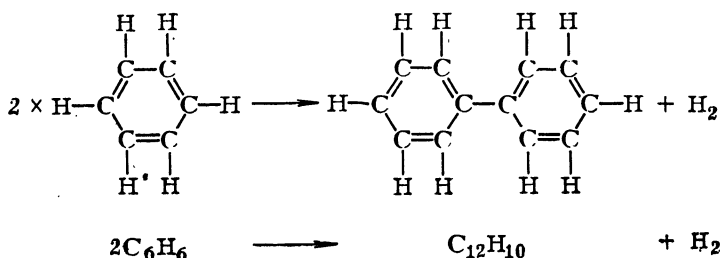


поглощенных газов (2,4—3,7%). В противоположность этому высокоароматизированное масло № 3 имеет меньшую скорость, но более продолжительное время газопоглощения и объем поглощенных им газов составляет при разных температурах от 70 до 100%. К тому же, как видно из рис. 2-11, при испытании масла № 3 в испытательном приборе достигается значительно большая степень разрежения, чем при испытании масла № 1, что в свою очередь свидетельствует о высокой газостойкости этого масла, так как степень разрежения в приборе характеризует стойкость масел к газовыделению. Исследования газостойкости масел в приборе типа Пирелли по методике ГОСТ 3903-67 (в среде водорода) также показали, что высокоароматизированные масла № 3 и 4 являются более стойкими к газовыделению. На рис. 2-14 приведены результаты исследований, из которых видно, что за время испытаний, равное 100 мин, маслом № 3 было поглощено водорода 1,5 см³, маслом № 2 — 0,7 см³,

а стандартным маслом № 1 после незначительного поглощения в течение первых 10 мин к концу испытания уже выделилось примерно 0,01 см³ газов.

Результаты испытания масел в реальных конденсаторах показывают, что конденсаторы, пропитанные маслами с большим процентом содержания ароматических углеводородов, являются более стойкими к перенапряжениям и имеют значительно больший срок службы, что вполне согласуется с результатами испытания этих масел на газостойкость.

Синтетические электроизоляционные жидкости на основе хлордифенила. Исходным продуктом для образования дифенила являются нагретые до 800°C пары бензола. Образование дифенила происходит по следующей схеме:



Различные хлорпроизводные дифенила (от монохлордифенила до декахлордифенила) можно получать в зависимости от степени его хлорирования (табл. 2-4).

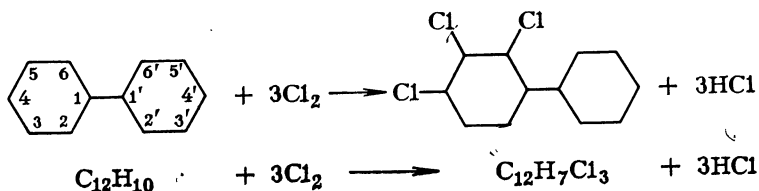
Таблица 2-4

Число теоретически возможных изомеров хлордифенилов

Число атомов хлора в молекуле продукта хлорирования	Продукт хлорирования	Число возможных изомеров
1	Монохлордифенилы	3
2	Дихлордифенилы	15
3	Трихлордифенилы	32
4	Тетрахлордифенилы	62
5	Пентахлордифенилы	66
6	Гексахлордифенилы	62
7	Гептахлордифенилы	32
8	Октахлордифенилы	15
9	Нонахлордифенилы	3
10	Декахлордифенилы	1

Хлорирование дифенила производят, пропуская через него в присутствии катализаторов газообразный хлор. В качестве катализаторов в основном применяется хлористое железо FeCl_3 и хлористая сурьма SbCl_3 . Количество пропускаемого газообразного хлора регулируется и определяет степень хлорирования.

Для трихлордифенила реакция замещения протекает по следующей схеме [Л. 1-5]:



После хлорирования полученный продукт подвергается дистилляции в вакууме с целью отделения от него смол и других изомеров. Выделенный таким образом хлордифенил после очистки сорбентами приобретает необходимые электроизоляционные свойства. При изготовлении хлордифенилов получают побочные продукты с ближайшими низшей и высшей степенями хлорирования (каждый до 10%). Так, например, трихлордифенил содержит в небольшом количестве тетра- и дихлордифенил.

Согласно [Л. 2-30] отдельные продукты хлорирования дифенила представляют собой кристаллические вещества, однако они получают только в начальной стадии хлорирования. При более глубоком хлорировании получают маслообразные жидкости или смолообразные вещества. Это объясняют образованием в процессе хлорирования дифенила смесей большого числа гомологов изомеров с резко замедленной скоростью кристаллизации. Согласно правилу Пикарда [Л. 2-30] замедление скорости кристаллизации основного вещества пропорционально корню квадратному из суммы молекулярных концентраций компонентов, добавленных в вещество. Отсюда следует, что способность хлорированного дифенила к кристаллизации должна уменьшаться с увеличением числа изомеров в продукте хлорирования. Как видно из табл. 2-4, максимальное число теоре-

тически возможных изомеров имеют продукты, соответствующие тетра-, пента- и гексахлордифенилу. Поэтому можно ожидать, что способность к кристаллизации у этих продуктов будет практически отсутствовать. При достижении хлорирования, соответствующего нона- и декахлордифенилу, число возможных изомеров очень мало, и у этих продуктов можно ожидать склонность к кристаллизации. В процессе хлорирования дифенила с повышением содержания связанного хлора (до 43%) получают хлордифенилы кристаллического строения, от 43% до 56% — в виде некристаллизующихся маслообразных жидкостей, от 56 до 67% — в виде полутвердых и твердых стекловидных веществ и от 67 до 70% — опять вещества кристаллического строения. В табл. 2-5 приведены отдельные изомеры моно-, ди- и трихлордифенила, из которой следует, что ряд изомеров при комнатной температуре находится в твердом состоянии.

4, 4'-дихлордифенил, у которого атомы хлора располагаются симметрично, не обладает полярными свойствами и имеет более высокую по сравнению с другими изомерами дихлордифенила температуру плавления, плохо растворяется и выпадает в виде кристаллов. Такой изомер легко образуется при низких степенях хлорирования и затрудняет изготовление дихлордифенила, пригодного для применения в качестве пропитывающего вещества.

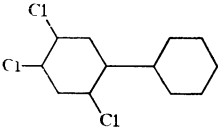
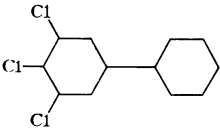
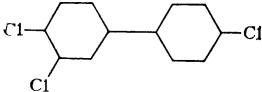
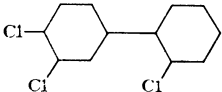
Смешением изомеров можно снизить температуру застывания смеси по сравнению с температурой застывания отдельных компонентов, обеспечивая при этом постепенный переход смеси из жидкого состояния в твердое и обратно.

Содержание хлора и его расположение в молекуле хлордифенила определяет электрофизические свойства хлордифенилов. Жидкие хлордифенилы являются прозрачными и почти бесцветными, их вязкость повышается с повышением степени хлорирования. Октахлордифенил является смолой, нона- и декахлордифенил (содержание хлора которых составляет 69 и 71%) являются кристаллическим порошком. Температурный коэффициент объемного расширения жидких хлордифенилов в диапазоне 0—100°C в среднем составляет около $7 \cdot 10^{-4}$ 1/град. Электрическая прочность при толщине слоя в несколько миллиметров в диапазоне 20—100°C составляет 20—25 МВ/м.

Таблица 2-5

Изомеры некоторых хлордифенилов

Изомер	Структурная формула	Температура плавления, °C
Моно-2-хлордифенил		31—31,5
Моно-3-хлордифенил		7—8
Моно-4-хлордифенил		74—76
2, 4-дихлордифенил		—
2, 5-дихлордифенил		17—18
3, 4-дихлордифенил		48—52
3, 5-дихлордифенил		26—30
4, 4'-дихлордифенил		145—148

Изомер	Структурная формула	Температура плавления, °C
2, 4, 5-трихлордифенил		79—80
3, 4, 5-трихлордифенил		72—75
3, 4, 4'-трихлордифенил		...
3, 4, 2'-трихлордифенил		~

В силовом конденсаторостроении нашли применение в основном пента-, тетра- и трихлордифенил. Это объясняется тем, что все другие хлордифенилы имеют относительно высокую температуру застывания и поэтому оказались непригодными для пропитки конденсаторов. Даже пентахлордифенил, который первым был применен в конденсаторостроении и в течение десятилетий за рубежом занимал почти монопольное положение, в последнее время имеет ограниченное применение из-за повышенной температуры застывания, которая составляет $+6 \div 10^\circ\text{C}$. Опыт эксплуатации показал, что в зимнее время при низких температурах наблюдается резкое снижение надежности и срока службы конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом. При этом наибольшее количество конденсаторов выходит из строя в момент их включения после длительного

перерыва в работе, достаточного для полного превращения пентахлордифенила в твердое состояние. Выход конденсаторов из строя объясняется тем, что при низких температурах вследствие неравномерности охлаждения в диэлектрике создается разрежение и образуются пустоты, в которых при повторном включении охлажденного конденсатора возникают частичные разряды, приводящие к его пробое. Кроме того, после повторного включения конденсаторов в работу вследствие неравномерного разогрева в диэлектрике создаются механические напряжения, которые могут приводить к образованию трещин и разрыву бумажных листов и в конечном итоге также к пробое диэлектрика.

Строго обоснованного определения допустимых пределов рабочей температуры конденсаторов, пропитанных различными электроизоляционными жидкостями, пока нет. Поэтому верхний и нижний пределы рабочей температуры конденсаторов определены ориентировочно на основании опытных данных. При этом для конденсаторов, пропитанных хлордифенилами, верхний предел рабочей температуры считается равным 95°C , а нижний, при котором допускается включение конденсаторов в работу, ограничивается температурой дипольного максимума $\text{tg } \delta$. Так, для конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом, нижний предел рабочей температуры принят равным минус 10°C , а трихлордифенилом — минус 35°C . Для расширения пределов рабочей температуры конденсаторов зарубежные фирмы выпускают ряд жидкостей с более низкой, чем у пента- и трихлордифенила, температурой застывания. Эти жидкости представляют собой смеси различных хлорпроизводных дифенила. Так, выпускаемые французской фирмой «Проделек» пиралены 1500, 1500S и 2000 имеют температуру застывания соответственно минус 24, 26 и 37°C ; смеси хлордифенилов с трихлорбензолом, как, клофен Т64 фирмы «Байер» (ФРГ) и пиралены 1460, 1477, — соответственно минус 35, 51, 58°C . Для отечественных силовых конденсаторов разработана и испытана серия хлорированных пропитывающих диэлектриков на основе хлорированных углеводов под условными наименованиями МГ, МГТ, КЖ.

На рис. 2-15—2-17 и в табл. 2-6, 2-7 представлены основные характеристики синтетических пропитывающих диэлектриков отечественного и зарубежного производ-

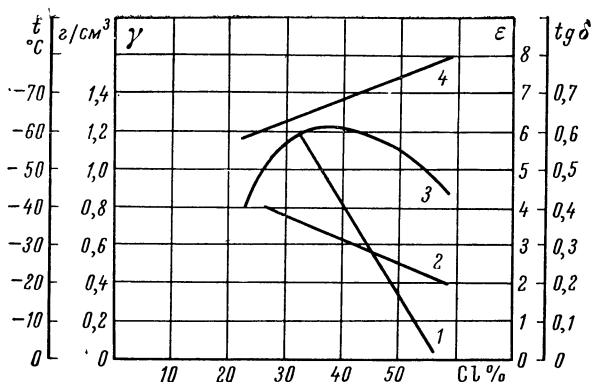


Рис. 2-15. Температура дипольного максимума $\text{tg } \delta$ (1) и $\text{tg } \delta$ при дипольном максимуме (2), диэлектрическая проницаемость (3) и плотность (4) хлордифенилов в зависимости от содержания в них хлора.

ва. На рис. 2-15 представлены плотность, диэлектрическая проницаемость, температура дипольного максимума $\text{tg } \delta$ и $\text{tg } \delta$ при дипольном максимуме в зависимости от содержания хлора в хлордифениле. Из рис. 2-15 видно, что с ростом содержания хлора в хлордифениле линейно возрастает его плотность, повышается температура дипольного максимума $\text{tg } \delta$ и снижается его значение при

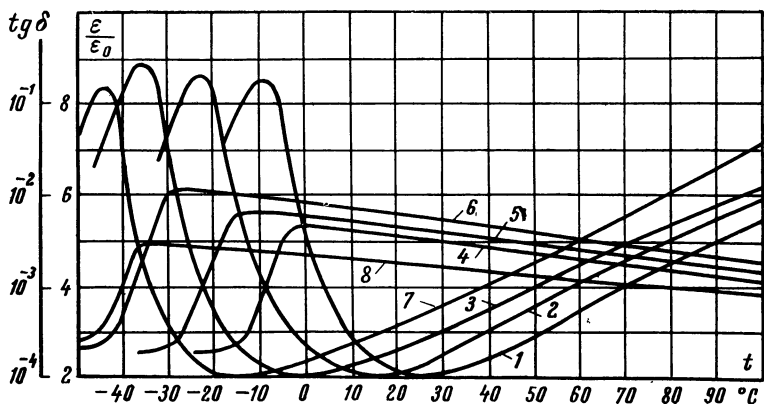


Рис 2-16. Тангенс угла потерь (1—3) и диэлектрическая проницаемость (4—6) хлордифенилов и касторового масла в зависимости от температуры.

1, 4 — пентахлордифенил; 2, 5 — тетрахлордифенил; 3, 6 — трихлордифенил; 7, 8 — касторовое масло.

температуре дипольного максимума. Зависимость диэлектрической проницаемости от степени хлорирования имеет максимум, соответствующий содержанию хлора, равному примерно 38%.

На рис. 2-16 показана зависимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ пента-, тетра- и трихлордифенила от температуры; из рисунка видно, что в зависимости $\operatorname{tg} \delta = f(t)$ имеется максимум

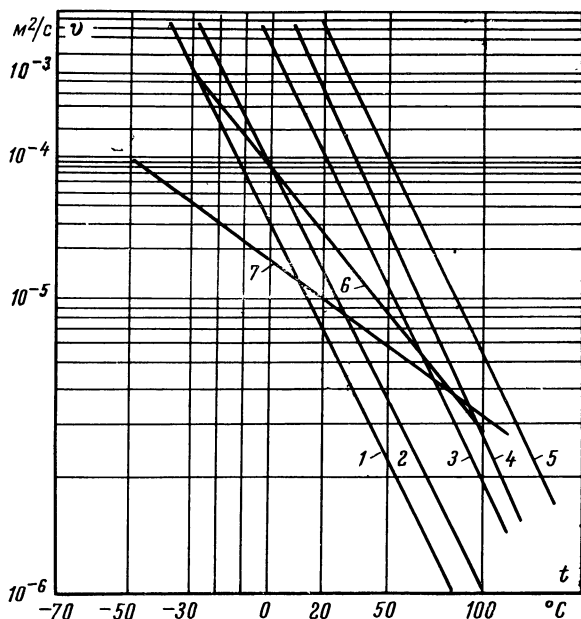


Рис. 2-17. Кинематическая вязкость жидких диэлектриков в зависимости от температуры.

1 — пирален 1477; 2 — КЖ-40; 3 — трихлордифенил; 4 — тетра-хлордифенил; 5 — пентахлордифенил; 6 — нефтяное масло; 7 — ФСТ-5.

и минимум, характерные для полярных диэлектриков. При снижении температуры состояние пропитывающего диэлектрика изменяется от жидкого до твердого и $\operatorname{tg} \delta$ при этом изменяется, как показано на рис. 2-16. В [Л. 2-31] показано, что при температуре T_d , при которой $\operatorname{tg} \delta$ имеет дипольный максимум, динамические вязкости полярных жидкостей различного происхождения структуры и состава примерно одинаковы. Из зависимостей $\operatorname{tg} \delta = f(t)$ и кинематической вязкости $\nu = f(t)$, при-

Основные характеристики хлорированных пропитывающих диэлектриков

Характеристика	МГ-15	Пентахлор- дифенил	Трихлор- дифенил	Пиралены		
				2000	3000	5000
Химическая формула	$C_{18}H_{17}Cl_2$	$C_{12}H_5Cl_5$	$C_{12}H_7Cl_3$	$C_{12}H_8Cl_2$	$C_{12}H_7Cl_3$	$C_{12}H_5Cl_5$
Плотность при 20°C, кг/м ³ , 10 ³	1,18	1,55	1,48	1,29	1,38	1,55
Вязкость, м ² /с, 10 ⁻⁶ при:						
20°C	—	—	—	16,2	65	—
50°C	66	18,7	8,15	—	—	—
Температура вспышки, °C	180	190	162	290	180	—
Температура застывания, °C	+10	+6	-18	-37	-19	+12
Кислотное число, мг КОН/г	Нейтральное	0,01	0,01	—	0,095	0,087
Испаряемость при 125°C в течение 2 ч, %	0,022	0,16	0,03	—	—	—
Диэлектрическая проницаемость ϵ/ϵ_0 при:						
20°C	6,1	5	5,8	6	6	5,1
90°C	5,2	4,2	4,7	4,88	4,9	4,3
tg δ , %, при:						
20°C	—	—	—	—	—	—
90°C	1,5	1,5	1,5	—	2	1
Удельное объемное сопротивление при 100°C, Ом·см	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²	12 ¹²	10 ¹²
Электрическая прочность, МВ/м	Больше 20					
Относительная газостойкость, %, при:						
20°C	—	150	150	—	—	—
70°C	—	150	150	—	—	—
90°C	—	150	150	—	—	—
Коэффициент газостойкости, см ³ /ч, по воздуху при:						
20°C	0,48	0,316	0,3	—	—	—
70°C	0,55	0,34	0,41	—	—	—
90°C	0,58	0,41	0,297	—	—	—
Коэффициент газостойкости на HCl, см ³ /ч, при 90°C	—	—	0,9	—	—	—

Основные характеристики смесей хлорированных пропитывающих диэлектриков

Характеристика	КЖ-30	КЖ-40	КЖ-50	МГТ-45	Пиралены	
					1500	1477
Химическая формула	$C_{12}H_7Cl_3$					
Плотность при 20°C, кг/м³, 10³	1,31	1,3	1,29	$C_8H_6Cl_4$ $C_8H_5Cl_3$ 1,47	$C_{12}H_7Cl_3$ $C_{12}H_9Cl_3$ 1,34	$C_{12}H_5Cl_5$ $C_{12}H_9Cl_3$ 1,49
Вязкость, м²/с, 10 ⁻⁶ , при:						
20°C	4,8	3,9	3,8	2,2	—	—
50°C	146	145	140	1,85	171	3,15
Температура вспышки, °C	—36	—46	—48	—70	—26	—58
Температура застывания, °C	0,005	0,007	0,007	Нейтральное	0,01	0,01
Кислотное число, мг КОН/г	0,2	0,22	0,24	1,4	0,39	2,56
Испаряемость при 125°C в течение 2 ч, %						
Диэлектрическая проницаемость (50 Гц) ϵ/ϵ_0 при:						
20°C	6	5,9	5,8	4,4	6	4,9
30°C	4,97	4,8	4,6	3,9	4,9	4,1
tg δ , %, при:						
20°C	—	—	—	—	—	—
30°C	1,0	1,0	1,0	1,0	2	3
Удельное объемное сопротивление при 100°C, Ом·см	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³
Электрическая прочность, МВ/м, при 50 Гц и 20°C	Больше 20					
Относительная газостойкость, %, при:						
20°C	150	150	150	150	—	150
70°C	150	150	150	37,5	—	69
90°C	150	150	150	—	—	45
Коэффициент газостойкости, см³/ч, при:						
20°C	0,47	0,26	0,35	0,19	—	0,2
70°C	0,44	0,43	0,42	0,064	—	0,14
90°C	0,38	0,187	0,27	—	—	0,083

веденных на рис. 2-16 и 2-17, можно заметить, что при минимуме $\operatorname{tg} \delta$ пента-, тетра- и трихлордифенил имеют одинаковую кинематическую вязкость, равную примерно $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ [Л. 2-43]. Температура, соответствующая минимуму $\operatorname{tg} \delta$, характерна тем, что является границей раздела зависимости $\operatorname{tg} \delta = f(t)$ на области, в которых на $\operatorname{tg} \delta$ оказывают влияние разные факторы. При увеличении температуры (снижении вязкости) повышение $\operatorname{tg} \delta$ связано с увеличением проводимости жидкости, а при снижении температуры (повышении вязкости) увеличение $\operatorname{tg} \delta$ обусловлено полярными свойствами хлордифенила [Л. 2-31].

Минимум электрической прочности $E_{\text{пр.мин}}$ хлордифенилов имеет место при тех же температурах, что и минимум их $\operatorname{tg} \delta_{\text{мин}}$ (т. е. при той же кинематической вязкости). Зависимость $E_{\text{пр}} = f(t)$ с ярко выраженным минимумом обусловлена главным образом механизмом ориентации диполей в направлении внешнего поля, создаваемого приложенным к электродам напряжением. Ориентация диполей приводит к образованию их собственного поля, которое способствует снижению электрической прочности. При снижении вязкости хлордифенилов с ростом температуры от точки, соответствующей $E_{\text{пр.мин}}$, повышается электрическая прочность их, обусловленная дезориентацией диполей вследствие усиливающегося теплового движения. К тому же, при снижении вязкости хлордифенилов за счет высокой подвижности ионов происходит быстрое рассасывание объемного заряда, что также способствует повышению электрической прочности. При снижении температуры от соответствующей $E_{\text{пр.мин}}$ более резкое повышение электрической прочности объясняется дополнительным влиянием вязкости, с возрастанием которой затрудняется образование объемного заряда и развитие пробоя [Л. 2-32—2-34]. При всех равных условиях с повышением полярности жидких диэлектриков их собственное поле, ориентированное в направлении внешнего поля, будет приводить к его усилению, снижая тем самым их электрическую прочность. Снижение электрической прочности жидких диэлектриков с возрастанием их $\epsilon_{\text{ж}}$ подтверждается результатами эксперимента [Л. 2-12].

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$, $\epsilon_{\text{ж}} = f(t)$ и $E_{\text{пр}}/E_{\text{пр.мин}} = f(t)$ трихлордифенила приведена на рис. 2-18, из которого видно совпадение минимума $\operatorname{tg} \delta$ и $E_{\text{пр}}$ при температуре около

минус 3°C — на $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$ выше температуры застывания и примерно на 30°C выше температуры дипольного максимума $\text{tg } \delta$ [Л. 2-31]. При снижении температуры от плюс 100°C до температуры дипольного максимума $\text{tg } \delta$ значение $E_{\text{пр}}$ трихлордифенила возрастает примерно в 1,9 раза. Электрическая прочность пропитывающей жидкости является одним из важных факторов, влияющих на электрическую прочность и напряженность частичных разрядов конденсаторной изоляции.

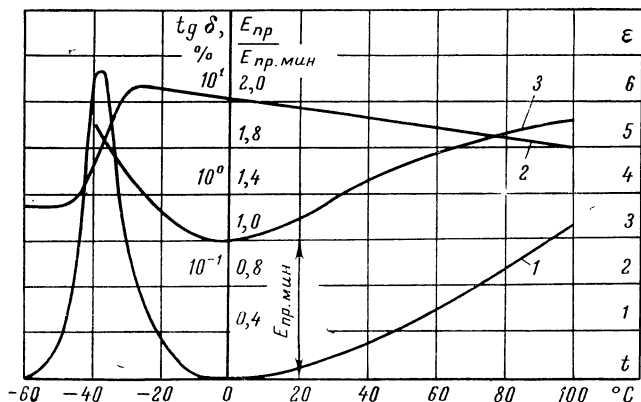


Рис. 2-18. Температурная зависимость характеристик трихлордифенила.

1 — $\text{tg } \delta$; 2 — ϵ ; 3 — отношение электрической прочности $E_{\text{пр}}$ к ее минимальному значению $E_{\text{пр. мин}}$.

Из табл. 2-6 и 2-7 следует, что пропитывающие диэлектрики типа КЖ имеют основные электрические характеристики ($\text{tg } \delta$, ρ_v , $E_{\text{пр}}$, $\epsilon_{\text{ж}}$), близкие к таковым для трихлордифенила, и более низкую температуру застывания. Положительной стороной этих диэлектриков является также их относительно невысокая испаряемость, которая значительно ниже испаряемости пиралена 1477. Высокая испаряемость пропитывающих диэлектриков усложняет термовакuumную обработку и пропитку конденсаторов. Хлордифенилы и другие хлорированные на их основе жидкие диэлектрики при испытании на газостойкость не показали выделения газов, а только их поглощение. На рис. 2-19, 2-20 приведены результаты испытаний различных хлорированных диэлектриков на газостойкость в воздушной среде. Из этих рисунков сле-

дует, что хлордифенилы и их смеси с хлордифенилоксидом при 20, 70 и 90°C создают максимальную степень разрежения в приборе (остаточное давление, близкое к давлению насыщенных паров), что характеризует высокую степень поглощения ими газов и их высокую стойкость к газовыделению. Хлорбензол в смеси с полихлорэтилбензолами (жидкость МГТ-45) имеет аналогичное состояние только при 20°C. При 70 и 90°C степень поглощения указанной смесью газов снижается.

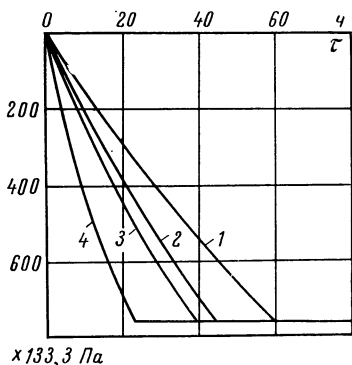


Рис. 2-19. Газостойкость трихлордифенила при испытании в среде воздуха (1—3) и хлористого водорода (4).

1, 4 — 20°C; 2 — 70°C; 3 — 90°C.

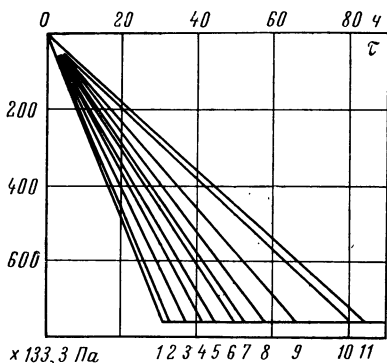


Рис. 2-20. Газостойкость различных пропитывающих жидкостей при испытании в среде воздуха.

1, 3 — МГ-15; 4, 6, 9 — КЖ-50; 5, 7, 8 — пентахлордифенил; 10 — МГТ-45; 11 — пирален 1477; 1, 5, 9 — 90°C; 2, 4, 7 — 70°C; 3, 6, 8, 10, 11 — 20°C.

Испытание электроизоляционных жидкостей в указанном приборе под вакуумом является весьма эффективным методом выявления их склонности к газовыделению при электрических разрядах. При этом методе перед началом испытаний в камере создается разрежение, а далее процесс испытания аналогичен испытаниям в газовой среде. Результаты испытаний различных электроизоляционных жидкостей приведены на рис. 2-21. Наиболее стойкими к газовыделению оказываются трихлордифенил, смесь хлордифенилов с хлордифенилоксидом (жидкости КЖ-40 и КЖ-50), смесь пентахлордифенила с хлорбензолом (пирален 1477) и трихлорбензол, которые за время испытания при указанных температурах вообще не показали никакого газовыделения. Значительно менее стойкими к газовыделению по сравнению

с жидкостями на основе хлорированных углеводородов являются нефтяные масла, газостойкость которых снижается с уменьшением содержания ароматических углеводородов. У смеси хлорбензола с полихлорэтилбензолом (МГТ-45) с возрастанием температуры наблюдается снижение газостойкости. Однако и при повышенных тем-

×133,3 Па

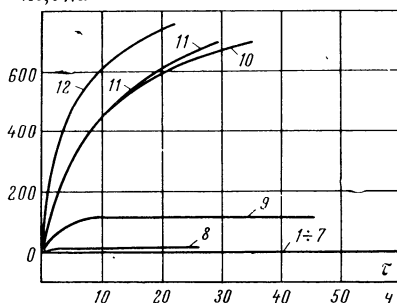


Рис. 2-21. Газостойкость различных пропитывающих жидкостей при испытании в вакууме и температуре 20°C.

1—7 — трихлордифенил, КЖ-40, пирален 1477, КЖ-50, пентахлордифенил, трихлорбензол, смесь тетра-, три-, дихлордифенила с тетрахлорбензолом; 8 — МГТ-45; 9 — трихлорэтилбензол; 10 — масло № 3; 11 — масло № 4; 12 — масло № 2.

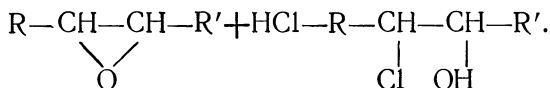
пературах ее газостойкость остается значительно более высокой по сравнению с самыми газостойкими нефтяными маслами (рис. 2-21). Таким образом, хлорированные электроизоляционные жидкости по газостойкости значительно превосходят нефтяные конденсаторные масла. Особенно стойкими оказываются хлордифенилы и их смеси с хлордифенилоксидом, которые вообще не показывают газовыделения.

У хлорированных электроизоляционных жидкостей при электрохимическом разложении и электрических разрядах резко снижается удельное объемное сопротивление ρ_v и повышается тангенс угла потерь $\tg \delta$ вследствие образования ионных примесей, HCl и углерода. Разложение пропитывающих жидкостей под действием электрического поля приводит к ускорению процесса старения конденсаторного диэлектрика и к сокращению срока службы.

Одним из направлений в совершенствовании пропитывающих диэлектриков (в основном хлордифенилов) является повышение их стойкости к воздействию постоянного и переменного электрического поля введением в них стабилизирующих добавок, для связи продуктов разложения, которые вызывают повышение $\tg \delta$ и снижение ρ_v .

Согласно [Л. 2-35] механизм старения хлордифенилов при воздействии постоянного и переменного напря-

жения различен. На постоянном напряжении конденсаторы, пропитанные хлордифенилами, удовлетворительно работают при умеренных температурах и невысоких напряженностях электрического поля. При повышенных температурах и напряженностях электрического поля под действием постоянного напряжения происходит электрохимическое разложение жидкостей с выделением H_2 и образованием HCl , поэтому для работы на постоянном напряжении в хлордифенилы вводятся добавки, которые способны связывать H_2 . Из большого числа исследованных стабилизирующих добавок, связывающих H_2 , наиболее эффективным оказался антрахинон, который применяется и для стабилизации нефтяных масел. При переменном напряжении в результате действия частичных разрядов происходит разложение хлордифенилов с выделением ионов Cl^- с последующим образованием HCl . В этом случае стабилизирующие добавки, связывающие H_2 , оказываются бесполезными. Поэтому добавка в хлордифенилы, работающие на переменном напряжении, антрахинона не улучшает их свойства, а даже ухудшает (увеличивает $tg \delta$). Наиболее эффективными стабилизаторами в этом случае оказались эпоксидные соединения, которые связывают появляющийся под действием частичных разрядов HCl с образованием хлоргидрина по формуле



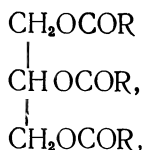
Как показывают результаты исследований, применение в силовых конденсаторах стабилизированных хлорированных пропитывающих жидкостей позволяет выбирать по сравнению с нестабилизированными более высокие рабочие напряженности электрического поля в диэлектрике и тем самым улучшать их удельные характеристики. Вопрос о применении стабилизированных хлордифенилов в конденсаторах с бумажно-плёночным диэлектриком, в которых рабочая напряженность электрического поля в 1,5—2 раза выше, чем в бумажных, является актуальным, так как при столь высокой напряженности поля процессы разложения более интенсивны.

Касторовое масло. В качестве диэлектрика касторовое масло известно сравнительно давно. Тем не менее широкое применение в силовых конденсаторах это масло

нашло в связи с развитием высоковольтной импульсной техники, где основным элементом накопительного устройства для получения мощных импульсов являются конденсаторы. Уже длительное время для пропитки конденсаторов постоянного напряжения используется нефтяное конденсаторное масло. Однако для бумажно-масляных конденсаторов к настоящему времени использованы почти все возможности дальнейшего их совершенствования в части повышения удельных характеристик, надежности и срока службы. В то же время в ряде областей науки и техники для импульсных установок требуются конденсаторы с более высокими удельными характеристиками и большим ресурсом работы на нагрузку с малым сопротивлением. Использование в качестве пропитывающего диэлектрика касторового масла позволяет в значительной мере улучшить характеристики конденсаторов, работающих в импульсном режиме, и тем самым удовлетворить многие запросы современной техники.

Касторовое масло является полярным диэлектриком, получаемым из семян клещевины путем горячей пресовки и экстракции. Масло, полученное прессованием, — прозрачное, бесцветное или слабо-желтого цвета. После прессования в жмыхах остается около 5,5% масла, которое извлекается экстракцией. Это масло имеет коричневый с зеленым оттенком цвет. Касторовое масло очень вязкое; его вязкость при 20°C достигает 1030—1040 м²/с и при изменении температуры очень плавно изменяется. В отличие от других это масло практически не окисляется на воздухе и поэтому относится к группе невысыхающих масел.

По своему составу касторовое масло представляет собой смесь триглицеридов, т. е. сложных эфиров глицерина и высокомолекулярных жирных кислот. В общем виде эти триглицериды представляются следующей формулой:



где R — радикал какой-либо жирной кислоты.

В химический состав касторового масла входят следующие кислоты: стеариновая и диоксистеариновая около 3%, олеиновая 3—9%, линолевая 2—3%, рицинолевая 80—93%. Основной компонент состава — рицинолевая кислота имеет следующую структурную формулу:



Эта кислота имеет одну двойную связь, т. е. является предельным соединением. В отличие от большинства жирных кислот других растительных масел она является оксикислотой, в которой помимо группы гидроксила — OH, входящей в карбоксильную группу COOH, содержится еще одна гидроксильная группа. Такая особен-

Таблица 2-8

**Основные характеристики касторового масла
и кремнийорганических оксидных диэлектриков**

Характеристика	Касторовое масло		Кремнийорганические диэлектрики		
	бразильское медицинское	опытное ВНИИЖ	ПМС-10	ФС-5	ФСТ-5
Плотность при 20°C, кг/м ³ , 10 ³	0,96	0,961	0,92	1,08	1,1
Вязкость, м ² /с, при:					
20°C	—	—	10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	4·10 ⁻⁵
100°C	1,8·10 ⁻⁵	1,68·10 ⁻⁵	3,2·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁶	10 ⁻⁵
Температура, °C:					
вспышки	280	—	170	200	290
застывания	—26	—27	—60	—100	—90
Кислотное число, мг КОН/г	1,28	0,9	—	—	0,032
Испаряемость при 125°C в течение 2 ч, %	0,009	—	—	—	0,031
ε/ε ₀ при:					
20°C	4,45	4,8	2,6	5,4	5,42
90°C	3,9	4,14	—	—	4,57
tg δ при:					
20°C	0,1	—	0,1	1,8	0,9
90°C	6	3,5	—	—	2,7
ρ _V при 100°C, Ом·см	3·10 ¹¹	8·10 ¹¹	10 ¹⁴	5·10 ¹²	6·10 ¹²
Коэффициент преломления при 20°C	1,4781	1,4809	—	—	—
Иодное число	86	87,4	—	—	—
Содержание золы, %	0,008	0,011	—	—	—

Примечание. ПМС-10 — кремнийорганическая полидиметилсилоксановая жидкость; ФС-5; ФСТ-5 — кремнийорганические фторированные жидкости.

ность структуры рицинолевой кислоты обуславливает относительно высокую полярность касторового масла [Л. 1-1, 2-36]. Химический состав касторового масла находится в большой зависимости от климатических условий произрастания клещевины.

В табл. 2-8 приведены физико-химические и электрические характеристики бразильского медицинского касторового масла и опытного образца конденсаторного касторового масла, полученного ВНИИЖ. Многие показатели этих масел довольно близки между собой. Однако опытный образец масла имеет несколько лучшие показатели по кислотному числу, ϵ , $\operatorname{tg}\delta$, ρ_v , что свидетельствует о лучшей его очистке по сравнению с бразильским маслом.

В табл. 2-8 и на рис. 2-13 приведены результаты испытания касторового масла на газостойкость, из которых видно, что это масло имеет значительно большую газостойкость по сравнению с самыми газостойкими нефтяными маслами. По характеру поведения при испытании на газостойкость касторовое масло приближается к хлордифенилу. Из рис. 2-16 видно, что аналогичная с хлордифенилами зависимость у касторового масла имеет место и для ϵ , $\operatorname{tg}\delta = f(t)$. Стойкость к газовыделению подтверждается и при испытании касторового масла в конденсаторах, в которых в импульсном режиме при напряженности критических частичных разрядов не наблюдается увеличение интенсивности ЧР.

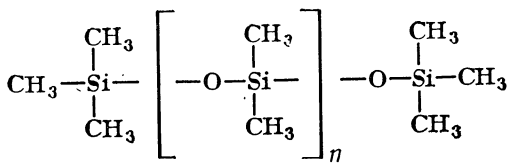
В СССР специальное электроизоляционное касторовое масло не выпускается, а для пропитки силовых конденсаторов используется техническое или медицинское масло. Указанные масла не соответствуют техническим требованиям и поэтому подвергаются дополнительной очистке сорбентами и термовакуумной обработке, при которых достигаются требуемые значения характеристик, главным образом $U_{\text{пр}}$ и $\operatorname{tg}\delta$. Касторовое масло очень чувствительно к различного рода примесям, в результате чего при повышенной температуре резко возрастает $\operatorname{tg}\delta$, снижается ρ_v масла и увеличивается их зависимость от температуры. После загрязнения и воздействия высокой температуры масло очень трудно поддается очистке, даже наиболее эффективными сорбентами, к которым относится смесь глины КИЛ с алюмогелем. Конденсаторы, пропитанные касторовым маслом, при длительной работе на постоянном напряжении и в им-

пульсном режиме с небольшой частотой следования импульсов по надежности и сроку службы показывают лучшие результаты по сравнению с пропиткой нефтяным маслом и хлордифенилами. Для конденсаторов переменного тока это масло не пригодно из-за увеличенного значения $\operatorname{tg}\delta$.

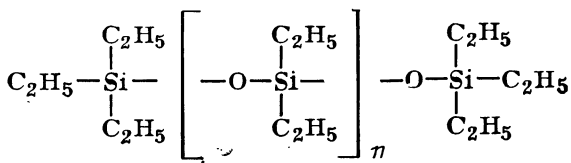
Синтетические электроизоляционные жидкости на основе кремнийорганических (полиорганосилоксановых) соединений. В силовых конденсаторах кремнийорганические пропитывающие диэлектрики находят ограниченное применение в основном из-за их высокой стоимости. Для некоторых видов конденсаторов, особенно конденсаторов с расширенным диапазоном рабочих температур, эти диэлектрики представляют интерес. Основными их достоинствами являются: низкая температура застывания и низкое значение вязкости в широком диапазоне температур; незначительное изменение электрических характеристик в большом интервале температур и частот; относительно высокая термическая и противоокислительная стабильность; совместимость со многими конденсаторными материалами. Существенным недостатком большинства кремнийорганических жидких диэлектриков является низкая газостойкость, малое значение $\epsilon_{\text{ж}}$ и горючесть.

Специфические свойства этих жидкостей связаны с их химической структурой и, в частности, с наличием звена — Si—O—Si [Л. 2-34]. Применяемые кремнийорганические диэлектрики являются полимерными соединениями, которые можно разделить на следующие основные группы.

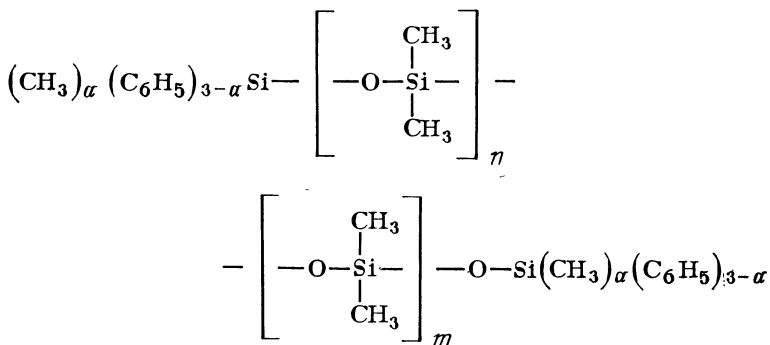
1. Полиметилсилоксановые (ПМС) жидкости — полимеры линейной структуры вида



2. Полиэтилсилоксановые (ПЭС) жидкости — полимеры преимущественно линейной структуры вида



3. Полиметилфенилсилоксановые (ПМФС) жидкости — полимеры, структура которых имеет следующий вид:

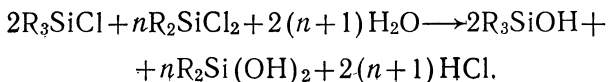


где $m=0 \div 20$; $n=1 \div 15$; $a=0 \div 3$.

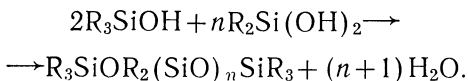
Индексы n и m характеризуют длину полимерных цепей и, таким образом, определяют молекулярную массу жидкости.

4. Полихлор-(фтор)-органосилоксановые соединения — полимеры, в которых метильные или фенильные радикалы в большей или меньшей степени замещены атомами хлора или фтора.

Товарные кремнийорганические жидкости представляют собой смеси соединений одного из указанных видов, но различных молекулярных масс. Чем больше n , тем менее летуча жидкость и тем выше температура ее застывания. Исходным материалом для получения кремнийорганических диэлектриков служат кремнийорганические хлорсодержащие соединения — органохлорсиланы. При взаимодействии смеси моно- и дифункциональных хлорсиланов с водой имеет место следующая реакция:



При этом образуются силаны, которые затем конденсируются с образованием следующих полимеров:



В заключительной стадии процесса при нагреве продуктов реакции до 300°C и остаточном давлении порядка $1 \cdot 10^2$ — $6 \cdot 10^2$ Па производится нейтрализация продуктов реакции и освобождение от воды, растворителей и низкомолекулярных полимеров.

Физические свойства этих диэлектриков связаны с особенностями строения молекул полимера, в частности с тем, что силы межмолекулярного взаимодействия в них значительно слабее, чем в углеводородах. Эта особенность и обуславливает их низкую температуру кипения и малую вязкость. Плотность большинства кремнийорганических жидкостей составляет $9,4$ — $9,8 \cdot 10^2$ кг/м³, и только у полимеров, содержащих фенильные или галогидные радикалы, плотность доходит до $(1,2$ — $1,4) \times 10^3$ кг/м³. Летучесть большинства из них в десятки раз меньше тяжелых нефтяных масел. Температуры вспышки и воспламенения кремнийорганических диэлектриков связаны с их летучестью. По данным [Л. 2-37, 2-38], температура вспышки колеблется от 145—150°C (ПМС-10 и ПЭС-Д) до 290°C (ФС-169). При температурах, превышающих температуру вспышки, указанные жидкости воспламеняются даже без контакта с открытым пламенем. Кремнийорганические диэлектрики обладают более высокой огнестойкостью по сравнению с аналогичными им по вязкости нефтяными маслами. Однако, за исключением некоторых, содержащих определенное количество хлор(фтор)атомов, их нельзя рассматривать как негорючие жидкости. Температура застывания большинства средневязких жидкостей ниже —60°C и повышается по мере увеличения их вязкости. Протоокислительная стабильность этих диэлектриков определяется их химической структурой. Полиметилсилоксановые жидкости медленно окисляются при температурах до 250°C, и в этих условиях они стабильнее нефтяных масел. Полиметилфенилсилоксановые жидкости обладают еще более высокой стабильностью, которая возрастает при увеличении отношения фенильных радикалов к метильным, поскольку последние легче окисляются.

Большинство кремнийорганических жидкостей, за исключением полихлор(фтор)органосилоксановых, имеет более низкую по сравнению с высокоароматизированными нефтяными маслами газостойкость. Под воздействием электрических разрядов происходит разложение жидкостей с выделением газа, главным образом водорода, а также твердых продуктов: двуокиси кремния, карбида кремния и углерода. На рис. 2-12 и 2-13 приведены результаты испытания масел и кремнийорганической жидкости ФСТ-5 на газостойкость. По времени газопоглощения и по степени снижения давления в испытательном приборе по газостойкости жидкость ПМС-10 уступает маслу № 3, а ФСТ-5 равноценна этому маслу. Введение в ПМС или в ПЭС соединений, содержащих фенольные группы, а также некоторых ароматических углеводородов позволяет существенно повысить газостойкость этих жидкостей. Основные физико-химические и электрические характеристики кремнийорганических жидкостей ПМС-10, ФСТ-5 и ФС-5 приведены в табл. 2-8.

2-4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИКА

Основным твердым диэлектриком в конденсаторах является бумага. Ее пористость, а также наличие в ее структуре гидроксильных групп обуславливают высокую гигроскопичность бумаги, причем наличие влаги ухудшает характеристики диэлектрика. В непропитанном состоянии бумага с $\gamma_0 = 1,25 \div 0,75 \cdot 10^3$ кг/м³ содержит около 20—50% воздуха по объему и 6—10% влаги по массе. При отсутствии специальных мер по кондиционированию воздуха в помещениях для переработки и хранения бумаги влажность ее может быть значительно выше 10%. Для получения высококачественного диэлектрика из бумаги в максимально возможной степени удаляется влага и воздух, после чего поры заполняются пропитывающим веществом. Этот процесс носит название термовакуумной обработки.

Количество влаги, остающейся в бумажной изоляции после достижения равновесного состояния при термовакуумной обработке, является функцией температуры и давления в термовакуумной камере. Согласно [Л. 2-39] для пористых гигроскопичных материалов при их влажности менее 10—12% такая зависимость выражается уравнением (2-27), которое соответствует периоду снижающейся скорости сушки:

$$W = W_{кр} e^{-c (t/t_0)^m (P/P_0)^{-n}}, \quad (2-27)$$

где W — влажность материала периода снижающейся скорости сушки; $W_{кр}$ — критическая влажность материала; t_0 и t — начальная и текущая температуры сушки материала; P_0 и P — начальное и остаточное давления при сушке материала; c — коэффициент, учитываю-

щий толщину материала h , влагоотдачу B_0 , влагопроводность K_0 , время τ , т. е.

$$c = \tau B_0 K_0 / h^2;$$

m , n , a , b , c — постоянные коэффициенты, определяемые из опыта.

На рис. 2-22 приведена зависимость влажности материала от остаточного давления при различных температурах [Л. 2-40]. Как

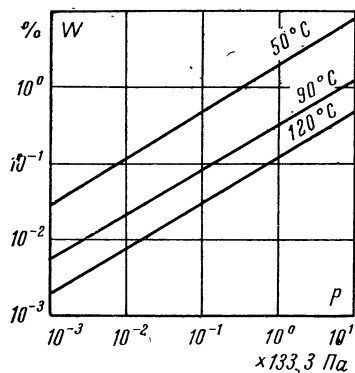


Рис. 2-22. Влажность сульфатно-целлюлозной бумаги в зависимости от остаточного давления и температуры [Л. 2-40].

видно, что длительный нагрев бумаги при 180°C практически не снижает ее электрической прочности (кривая 2), но вызывает заметное повышение $\text{tg } \delta$ (кривая 1). Минимум его значения имеет место при 120 — 130°C . Зависимость разрывной прочности от времени воздействия при разных температурах показана на рис. 2-24, а от числа двойных перегибов n — на рис. 2-25. Из этих рисунков следует, что при температуре выше 120 — 130°C наблюдается резкое ухудшение механических характеристик бумаги. К тому же, как видно из рис. 2-26, при температуре выше 130°C значительно увеличивается количество влаги, выделяемой из бумаги вследствие ее термического разложения. Из сказанного следует, что оптимальной температурой сушки бумажного диэлектрика является 120 — 130°C . Остаточное давление, достигаемое в современных термовakuумных установках, равно 10^{-1} — 10^{-2} Па.

При термовakuумной обработке изоляции из синтетических пленок, которые не являются пористыми системами, влага удаляется только с их поверхности. Температура и длитель-

ность из рис. 2-22, а также уравнения (2-27), для удаления из бумаги наибольшего количества влаги процесс термовakuумной обработки необходимо вести при максимально допустимой температуре и минимальном остаточном давлении. Максимально допустимая температура сушки определяется термостойкостью бумаги, а минимальное остаточное давление — техническими возможностями и экономическими соображениями.

Термостойкость бумажного диэлектрика оценивается по изменению $\text{tg } \delta$, электрической прочности $E_{\text{пр}}$, механических свойств — прочности на разрыв, числа двойных перегибов, сопротивления продавливанию и пр. Зависимости этих параметров от времени при различных температурах приведены на рис. 2-23—2-25, из которых

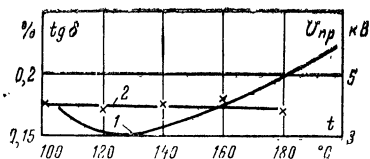


Рис. 2-23. Пробивное напряжение и $\text{tg } \delta$ конденсаторной бумаги в зависимости от температуры, при которой она выдерживалась в течение указанного на рис. 2-24 времени.

1 — $\text{tg } \delta$; 2 — пробивное напряжение,

ность сушки должна быть согласована с термостойкостью пленки. В бумажно-пленочном диэлектрике температура сушки ограничивается, главным образом, термостойкостью пленок, а продолжительность сушки устанавливается в зависимости от содержания влаги в бумаге. Сохранение электрических характеристик диэлектрика на уровне, достигнутом непосредственно после сушки и удаления газов, осуществляется немедленной герметизацией конденсаторов после их термовакuumной обработки.

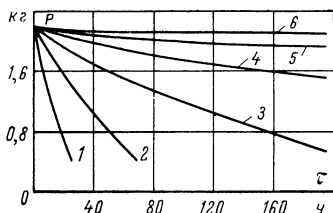


Рис. 2-24. Зависимость разрывной прочности от времени воздействия различных температур.

1 — 200°C; 2 — 180°C; 3 — 160°C; 4 — 140°C; 5 — 120°C; 6 — 100°C.

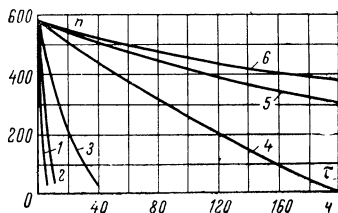


Рис. 2-25. Зависимость числа двойных перегибов от времени выдержки при температурах, указанных на рис. 2-24.

1—6 — то же, что на рис. 2-24.

От процесса термовакuumной обработки во многом зависят характеристики пропитываемых диэлектриков, которые, в зависимости от давления и температуры, растворяют различное количество газов и влаги в своем объеме. Согласно данным [Л. 2-41] при нормальном атмосферном давлении ($1,013 \cdot 10^5$ Па) и 20—25°C в состоянии насыщения в 1 см³ нефтяного масла, аналогичного конденсаторному, содержится в среднем 0,1 см³ воздуха. Растворимость газов в жидкости характеризуется законом Генри

$$X = K(t)P, \quad (2-28)$$

где X — растворенное количество газов, см³; $K(t)$ — коэффициент растворимости, зависящий от температуры; P — давление растворяющегося газа над жидкостью, Па.

Объемное содержание растворенного в жидком диэлектрике воздуха согласно (2-28) можно выразить в виде

$$V = (K_0 \pm \alpha t) \frac{P}{P_0} V_{\text{ж}}, \quad (2-29)$$

где V — объем растворимого в жидком диэлектрике воздуха, см³; $V_{\text{ж}}$ — объем жидкого диэлектрика, см³; K_0 — коэффициент растворимости при $t=0^\circ\text{C}$; α — температурный коэффициент растворимости воздуха; t — температура жидкого диэлектрика; $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па.

По данным [Л. 2-42] для конденсаторного масла $K_0 = 9,3 \cdot 10^{-3}$; $\alpha = 2,44 \cdot 10^{-4}$ 1/град. При известных K и α по (2-29) можно определить объемное содержание воздуха, растворенного в жидком диэлектрике после термовакuumной обработки при различных остаточном давлении и температуре.

мг/кг.

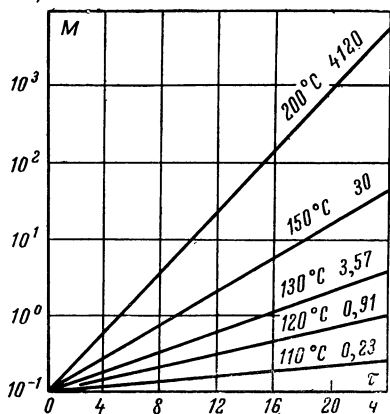


Рис. 2-26. Количество выделяемой из бумаги воды при ее термическом разложении в зависимости от времени выдержки при различных температурах.

$$V_1 = V_{\text{ж}} \frac{P}{P_0} (K_0 \pm \alpha t) + V_{\text{в}} \frac{P}{P_0}. \quad (2-30)$$

Так как при пропитке объем воздуха замещается пропитывающим диэлектриком, то можно принять $V_{\text{ж}} = V_{\text{в}}$ и (2-30) представить в виде

$$V_1 = V_{\text{ж}} \frac{P}{P_0} [1 + (K_0 \pm \alpha t)]. \quad (2-31)$$

В этом случае содержание растворимого воздуха (в процентах) будет определяться выражением:

$$K = \frac{V_1}{V_{\text{ж}}} 100 = \frac{P}{1,013 \cdot 10^3} [1 + (K_0 \pm \alpha t)]. \quad (2-32)$$

От количества газов, содержащихся в пропитывающих жидкостях, зависит электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ жидкостей и напряженность возникновения частичных разрядов $E_{\text{кр}}$ в конденсаторах, пропитанных этими жидкостями [Л. 2-21]. На рис. 2-27 приведена $E_{\text{пр}}$ нефтяного масла с различным газосодержанием, зависящим от давления, а на рис. 4-15 — $E_{\text{кр}}$ конденсаторов и содержание воздуха

В производстве силовых конденсаторов термовакуумная обработка твердого (бумажного, бумажно-пленочного и пленочного) и пропитывающего диэлектриков производится раздельно. Объемное содержание воздуха, растворенного в пропитывающей жидкости до заливки и пропитки ею твердого диэлектрика, может быть определено по уравнению (2-29). После пропитки конденсаторов объемное содержание воздуха в пропитывающем диэлектрике возрастает за счет воздуха, находящегося в порах бумажного диэлектрика, между его слоями и в незаполненной части корпуса. Объемное содержание воздуха в жидком диэлектрике после пропитки конденсаторов может быть рассчитано по формуле:

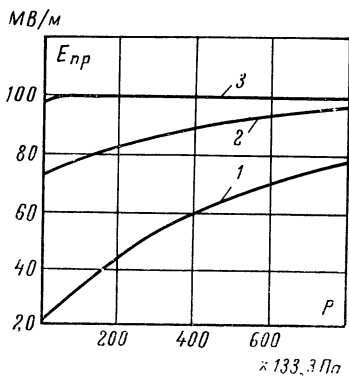


Рис. 2-27. Зависимость электрической прочности нефтяного масла от давления.

1 — недегазированное; 2 — выдержанное при $4,25 \cdot 10^4$ Па до равновесного состояния; 3 — дегазированное.

в масле от остаточного давления при термовакuumной обработке. Из приведенных зависимостей видно, что с уменьшением в пропитывающих диэлектриках газов возрастает их $E_{пр}$ и $E_{кр}$ конденсаторов.

Глава третья

КРАТКОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ

3-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В КОНДЕНСАТОРЕ

Электрическое поле относится к одному из основных факторов, определяющих характеристики конденсатора. В секции конденсаторов можно выделить две области поля: сильно неравномерное и равномерное. Сильно неравномерное поле создается на краю фольги и сохраняется от края обкладки на расстоянии, примерно на порядок превышающем толщину диэлектрика. При больших расстояниях от края, в области основной изоляции, поле плоскопараллельно и напряженности поля в каждом из слоев диэлектрика постоянны. В большинстве случаев характеристики изоляции относят к средней расчетной напряженности электрического поля

$$E = U_c / d_c, \quad (3-1)$$

где U_c — приложенное к секции напряжение; d_c — расчетная толщина изоляции секции, равная номинальной толщине его твердой фазы.

В области плоскопараллельного поля силовые линии направлены перпендикулярно слоям бумаги или пленки. В области неравномерного поля возникают значительные составляющие напряженности, направленные вдоль слоев твердой фазы. Электрическая прочность вдоль слоев в 10—20 раз ниже ее значения поперек слоев. Поэтому наличие продольной составляющей напряженности облегчает развитие местных разрядов вдоль слоев. Напряженность поля E_r на расстоянии r от края электрода при $r < 0,1 d_c$ может быть оценена по формуле [Л. 3-1, 3-2]

$$E_r = U_c / \sqrt{\pi d_c r}. \quad (3-2)$$

Условием возникновения местных частичных разрядов у края обкладки следует считать равенство напряженности поля на некотором расстоянии r_0 от края обкладки значению E_{r0} , достаточному для развития разряда. Если U_H — напряжение возникновения местных разрядов, то

$$E_{r0} = U_H / \sqrt{\pi d_c r_0} \quad (3-3)$$

и, следовательно,

$$U_H = E_{r0} \sqrt{\pi r_0} \sqrt{d_c} = A d_c^{0,5}, \quad (3-4)$$

где A — постоянная.

Средняя напряженность возникновения местных разрядов E_H равна:

$$E_H = A d_c^{-0,5}. \quad (3-5)$$

Для оценки напряженности поля вблизи края фольги можно воспользоваться также расчетом поля пластины с закругленным

краем, расположенной против плоскости [Л. 3-3], или пластины с закругленным краем, заключенной между двумя симметрично расположенными плоскостями, имеющими одинаковый потенциал. В этом случае напряженность поля у края пластины с радиусом r , расположенной на расстоянии d_c от плоскости (или плоскостей), может быть определена по формуле

$$E_{\text{макс}} = GE \sqrt{(d_c + r)/r}, \quad (3-6)$$

где E определяется по формуле (3-1).

При малых значениях r $G \approx 1/\sqrt{\pi}$, при больших — $G \rightarrow 1$. Если принять, что частичные разряды возникают при определенной максимальной напряженности у поверхности электрода E_0 , то при $r \ll d_c$ средняя напряженность возникновения частичных разрядов может быть рассчитана по формуле

$$E_H = E_0 \sqrt{r/G} \sqrt{d_c} = Ad_c^{-0,5}. \quad (3-7)$$

Постоянная A в (3-5) и (3-7) зависит от вида частичных разрядов, сорта диэлектрика, конструктивных и технологических факторов. Таким образом, формулы для зависимости напряженности возникновения частичных разрядов от толщины диэлектрика (3-5) и (3-7) совпадают.

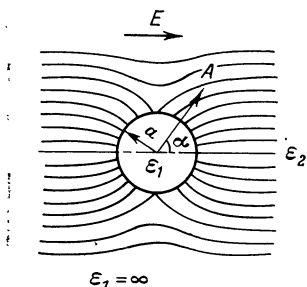


Рис. 3-1. Проводящий шар в однородном поле.

из-за наличия токопроводящих включений в твердой или жидкой фазе диэлектрика. Если включения имеют форму шара радиусом a (рис. 3-1), то напряженность поля E_2 на поверхности шара может быть вычислена по формуле [Л. 3-4]

$$E_2 = 3E_0 \cos \alpha, \quad (3-8)$$

где E_0 — напряженность однородного поля; α — угол, образуемый радиус-вектором, проведенным из центра шара в данную точку A , и направлением поля. Искажение электрического поля может иметь место и в том случае, когда включение является диэлектриком с ϵ_1 ; если $\epsilon_1 < \epsilon_2$, то $E_1 > E_2$ и составляет

$$E_1 = E_0 3\epsilon_2 / (\epsilon_1 + 2\epsilon_2). \quad (3-9)$$

Формула (3-9) может быть полезна при исследованиях частичных разрядов в диэлектрике конденсатора.

В области плоскопараллельного поля средняя напряженность поля в изоляции может существенно отличаться от значения E , рассчитанного по (3-1), в силу того, что для реальной секции согласно (1-2) $d = d_c/k$. При этом средняя напряженность электрического поля E' с учетом коэффициента запрессовки изоляции равна:

$$E' = U_c k / d_c. \quad (3-10)$$

Для идеальной трехкомпонентной системы изоляции (рис 1-6) при переменном напряжении напряженности поля в компонентах диэлектрика — клетчатке E_k , пленке E_n и пропитывающей жидкости $E_{ж}$ — связаны со средней напряженностью поля E' следующими соотношениями:

$$E_k = \frac{d_c}{k \varepsilon_k \sigma_s} E'; \quad (3-11)$$

$$E_n = \frac{d_c}{k \varepsilon_n \sigma_s} E'; \quad (3-12)$$

$$E_{ж} = \frac{d_c}{k \varepsilon_{ж} \sigma_s} E', \quad (3-13)$$

где $\sigma_s = d_k/\varepsilon_k + d_n/\varepsilon_n + d_{ж}/\varepsilon_{ж}$; ε_k , ε_n , $\varepsilon_{ж}$ и d_k , d_n и $d_{ж}$ — соответственно диэлектрические проницаемости и толщины слоев клетчатки, пленки и пропитывающей жидкости.

Подставляя вместо d_k , d_n и $d_{ж}$ их значения, приведенные в гл. 2, после преобразований получаем:

$$E_k = \frac{\beta}{\Psi_s} E'; \quad (3-14)$$

$$E_n = \frac{\beta \varepsilon_k / \varepsilon_n}{\Psi_s} E'; \quad (3-15)$$

$$E_{ж} = \frac{1}{\Psi_s} E', \quad (3-16)$$

где

$$\Psi_s = 1 + k \left(\frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_n} \beta - 1 \right) - \kappa \left[\frac{k \gamma \sigma}{\gamma_k} (1 - \beta) + k \left(\beta \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_n} - 1 \right) \right];$$

$$\kappa = \frac{nd_1}{nd_1 + n'd'_1}$$

— доля бумаги в изоляции секции;

$\beta = \varepsilon_{ж} / \varepsilon_k$.

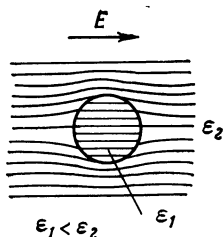


Рис. 3-2. Диэлектрический шар в однородном поле.

Если $\epsilon_k = \epsilon_n = \epsilon_{ж}$, то $E_k = E_n = E_{ж} = E'$. Для предельных значений $\kappa = 0$ (пленочная изоляция с жидким наполнителем) и $\kappa = 1$ (бумажно-пропитанная изоляция), получим формулы, соответствующие двухкомпонентной системе изоляции.

Изменение толщины изоляции секции за счет изменения коэффициента запрессовки k при $E = \text{const}$ приводит к изменению напряженности поля во всех компонентах в одном и том же соотношении. При $\epsilon_{ж} < \epsilon_k$ в бумажно-пропитанном диэлектрике при переменном напряжении наибольшая напряженность возникает в пропитывающей жидкости. В этом случае с ростом плотности бумаги γ_6 напряженность в жидком диэлектрике увеличивается. В случае применения неполярной пленки ($\epsilon_n < \epsilon_k$ и $\epsilon_n < \epsilon_{ж}$) наибольшая напряженность возникает в слоях пленочного диэлектрика. Изменение диэлектрической проницаемости любого компонента изменяет относительное распределение поля между компонентами.

При постоянном напряжении напряженности поля в компонентах пропорциональны их удельным объемным сопротивлениям (или обратно пропорциональны проводимостям) и соответственно равны:

$$E_k = E' = \rho_k d_k / k \sigma_p; \quad (3-17)$$

$$E_n = E' = \rho_n d_n / k \sigma_p; \quad (3-18)$$

$$E_{ж} = E' = \rho_{ж} d_{ж} / k \sigma_p, \quad (3-19)$$

где $\sigma_p = \rho_k d_k + \rho_n d_n + \rho_{ж} d_{ж}$; ρ_k , ρ_n и $\rho_{ж}$ — удельные объемные сопротивления клетчатки, пленки и пропиточной жидкости. Подставив в (3-17) — (3-19) вместо d_k , d_n и $d_{ж}$ их значения и преобразовав, получим значения напряженностей поля для разных компонентов изоляции:

$$E_k = E' = \rho_k / k \Psi_p; \quad (3-20)$$

$$E_n = E' = \rho_n / k \Psi_p; \quad (3-21)$$

$$E_{ж} = E' = \rho_{ж} / k \Psi_p, \quad (3-22)$$

где

$$\Psi_p = \frac{1 - k}{k} \rho_{ж} + \rho_n - \kappa \left[\rho_n - \rho_{ж} - \frac{\gamma_6}{\gamma_k} (\rho_k - \rho_{ж}) \right].$$

Так как $\rho_{ж} < \rho_k$ и $\rho_{ж} < \rho_n$, то при постоянном напряжении наименьшая напряженность поля возникает в прослойках жидкого диэлектрика. Обычно $\rho_n > \rho_k$, и поэтому наибольшая напряженность в бумажно-пленочной изоляции возникает в слоях пленки. Если диэлектрик работает на пульсирующем напряжении, содержащем постоянную и переменную составляющие, напряженности поля в компонентах определяются как сумма напряженностей переменной и постоянной составляющих по (3-14) — (3-16) и (3-20) — (3-22).

3-2. ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И ПЛОЩАДИ ДИЭЛЕКТРИКА НА КРАТКОВРЕМЕННУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Одним из важнейших показателей, характеризующих электроизоляционные свойства диэлектрика, является его кратковременная электрическая прочность, которая

определяется при быстром (в течение секунд или десятков секунд) подъеме напряжения до пробоя диэлектрика. Она определяется, главным образом, прочностью его твердой фазы, однако свойства пропиточных жидкостей также оказывают на нее определенное влияние [Л. 3-5].

Количественно электрическая прочность характеризуется отношением пробивного напряжения $U_{пр}$ к расчетной толщине диэлектрика d_c , т. е. напряженностью электрического поля $E_{пр} = U_{пр}/d_c$.

На рис. 3-3 приведена экспериментальная зависимость $E_{пр}$ от толщины изоляции из пропитанной бумаги КОН-1 с толщиной листа 10 мкм. В этой зависимости при определенной толщине изоляции $d_c = d_{c.макс}$ наблюдается максимум электрической прочности $E_{пр}$. Снижение $E_{пр}$ при $d_c > d_{c.макс}$ обусловлено увеличением искажения поля на краю электродов с ростом толщины изоляции. При $d_c < d_{c.макс}$ снижение $E_{пр}$ обусловлено ростом

влияния сквозных пор и токопроводящих включений. При неизменной толщине изоляции изменение толщины одиночного бумажного листа приводит к изменению $E_{пр}$. Уменьшение толщины бумажного листа сдвигает $d_{c.макс}$ в сторону меньших значений ввиду того, что доля пор в общей толщине диэлектрика будет уменьшаться. На рис. 3-4 приведена экспериментальная зависимость $d_{c.макс}$ от толщины листа. У обычных конденсаторных бумаг с толщиной листа 10—11 мкм, пропитанных трихлордифенилом, максимум $E_{пр}$ наблюдается при $d_{c.макс} = 40 \div 50$ мкм. У пропитанного бумажного диэлектрика величина $E_{пр}$ имеет значительный разброс, причем среднеквадратичное отклонение σ возрастает с уменьшением его толщины. Для $50 \leq d_c \leq 80$ мкм $\sigma = (0,07 \div 0,1) \cdot E_{пр.ср}$. При толщинах, близких к опти-

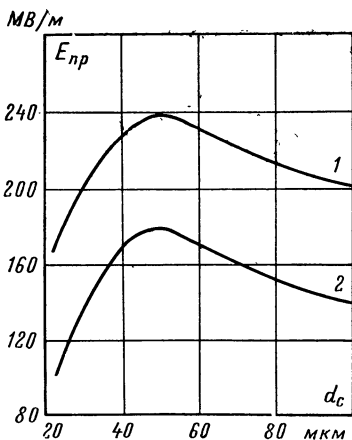


Рис. 3-3. Зависимость кратковременной электрической прочности бумажного диэлектрика от толщины при постоянном (1) и переменном (2) напряжении (амплитудные значения). Пропитка — трихлордифенил.

Мальной, распределение пробивных напряжений подчинено нормальному закону. Пропитанная бумажная изоляция с бумагами повышенной электрической прочности при $d_c \leq 40$ мкм имеет значение $E_{пр}$, на 25—30% превы-

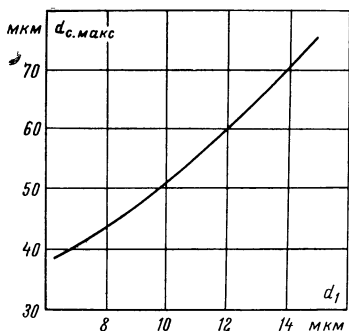


Рис. 3-4. Зависимость $d_{с. макс}$ от толщины бумажного листа d_1 .

шающее электрическую прочность изоляции с обычными бумагами. При $d_c > 40$ мкм этого преимущества не существует. С увеличением плотности γ_b электрическая прочность бумаги увеличивается. У диэлектрика из синтетической пленки с жидким наполнителем максимум в кривой $E_{пр} = f(d_c)$ сдвигается в область малых толщин ($d_{с. макс} \approx 20$ мкм), как это видно из рис. 3-5. Для пленочного и бумажно-пленочного диэлектрика значение $E_{пр}$ значительно выше, чем у бумажного, а разброс этих значений существенно меньше. Это объясняется большей по сравнению с бумагой однородностью пленок.

Характер зависимости $E_{пр} = f(d_c)$, аналогичный приведенному на рис. 3-3, сохраняется как для постоянного, так и для переменного напряжения. Из рис. 3-3 видно, что $E_{пр}$ при постоянном напряжении примерно вдвое выше действующего значения $E_{пр}$ при переменном напряжении промышленной частоты. Объясняется это тем, что на переменном напряжении в предпробивной период появляются частичные разряды. Они возникают при напряжениях более низких, чем пробивное, их интенсивность возрастает с увеличением напряжения, что приводит к частичному разрушению твердой фазы еще до наступ-

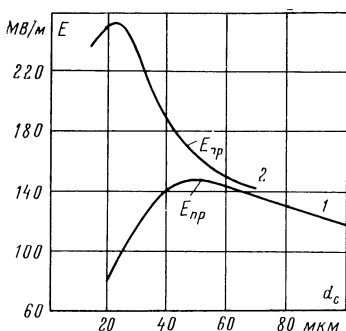


Рис. 3-5. Зависимость электрической прочности бумажного (кривая 1) и бумажно-пленочного (кривая 2) диэлектрика от толщины (действующее значение). Пропитка — трихлордифенил. Содержание пленки — 50%.

ления пробоя. Различие в характеристиках частичных разрядов объясняет некоторую разницу в значениях $E_{\text{пр}}$ при переменном напряжении при пропитке диэлектрика различными жидкостями. Влияние характеристик жидкости на $E_{\text{пр}}$ пленочного и бумажно-пленочного диэлектрика зависит от соотношения $\epsilon_{\text{ж}}$ и $\epsilon_{\text{п}}$.

Уровень кратковременной электрической прочности при воздействии импульсного напряжения может быть различным в зависимости от формы и характера воздействия этого напряжения. При одиночном кратковременном униполярном импульсе электрическая прочность будет больше, чем при постоянном напряжении. Повышение частоты следования импульсов снижает $E_{\text{пр}}$ вследствие эрозии диэлектрика частичными разрядами. Численное значение $E_{\text{пр}}$ при импульсном напряжении должно определяться в каждом конкретном случае.

Изменение соотношения между долями компонентов диэлектрика может менять характер пробоя при переменном напряжении. При некотором соотношении между толщинами слоев твердой фазы и жидкости эти слои будут равнопрочными и повышение напряжения приводит к полному пробоя. Если электрическая прочность слоя твердой фазы выше, чем слоя жидкости, пробой будет носить последовательный характер: вначале наступит пробой жидкой фазы (т. е. частичный разряд в изоляции), а при дальнейшем повышении напряжения наступает его полный пробой. В реальной конденсаторной изоляции соотношение между толщинами твердой и жидкой фаз таково, что пробой имеет последовательный характер во всем диапазоне применяемых толщин диэлектриков, за исключением случая пропитанной бумажной изоляции, в которой количество слоев равно двум или менее. При изменении коэффициента запрессовки k изменяется общая толщина диэлектрика d за счет изменения толщины слоя попитывающей жидкости при неизменной толщине твердой фазы $d_{\text{т}}$. А так как прочность пропитанной изоляции определяется главным образом прочностью твердой фазы, то значения $U_{\text{пр}}$ и $E_{\text{пр}}$ остаются практически неизменными [Л. 3-6, 3-7]. Поэтому даже при изменении коэффициента запрессовки для оценки электрической прочности конденсаторной изоляции пользуются значением $E_{\text{пр}}$, вычисленным по (3-1).

На электрическую прочность конденсаторной изоляции оказывают влияние токопроводящие включения

(ТПВ), содержащиеся в конденсаторной бумаге. Совпадение ТПВ в разных листах бумаги в направлении силовых линий электрического поля приводит к появлению з изоляции слабых мест.

При небольшой площади электродов вероятность совпадения двух ТПВ мала и можно считать, что каждое включение шунтирует только один лист бумаги. В этом случае для двух слоев $U_{\text{пр}}$ определяется прочностью только одного листа, для трех — двумя, четырех — тремя и для n слоев — прочностью $(n-1)$ листов. Таким образом, при $d_c < d_{\text{с.макс}}$

$$U_{\text{пр}} = E_{06} (n-1) d_1, \quad (3-23)$$

где E_{06} — электрическая прочность пропитанного бумажного листа при отсутствии включений.

Значение средней пробивной напряженности $E_{\text{пр}}$ определяется соотношением

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / n d_1 = E_{06} (n-1) / n. \quad (3-24)$$

Если в диэлектрике, состоящем из n листов, ТПВ совпадают в q листах, то значение $E_{\text{пр}}$ может быть определено по следующей формуле:

$$E_{\text{пр}} = E_{06} (n-q) / n. \quad (3-25)$$

Вероятность W^q_n совпадений ТПВ в q из n листов диэлектрика согласно [Л. 3-8] может быть вычислена по формуле

$$W^q_n = \binom{n}{q} p^q_0 S_0^{(q-1)} S, \quad (3-26)$$

где $\binom{n}{q}$ — число сочетаний из n по q ; p_0 — вероятность попадания ТПВ на 1 см² листа бумаги; S_0 — эффективная площадь включения; S — активная площадь листа.

Используя (3-26), можно найти зависимость вероятности совпадения слабых мест W (или значений электрической прочности) от площади изоляции S . Экспериментально установлено, что зависимость $E_{\text{пр}}$ от S описывается эмпирической формулой [Л. 1-1]

$$E_{\text{пр}} = A - B \lg S, \quad (3-27)$$

где A и B — постоянные.

Из (3-27) следует, что с ростом S уменьшается $E_{\text{пр}}$, что связано с увеличением вероятности совпадения сла-

бых мест. Это повышает вероятность пробоя при неизменном напряжении. Распределение $E_{\text{пр}}$ для заданного диэлектрика в большинстве случаев описывается нормальным законом [Л. 1-1].

Экспериментальное определение электрической прочности обычно производится на образцах ограниченной площади, много меньшей площади реальных секций. С помощью статистических закономерностей результаты, полученные на образцах с одной площадью, могут быть распространены на образцы с другой площадью. Вероятность пробоя F при напряжении не более U образца с площадью S связана с вероятностью пробоя F_m при напряжении не более U образца с площадью mS соотношением

$$F_m = 1 - (1 - F)^m. \quad (3-28)$$

Обозначим $U_{\text{ср}}$ — среднее пробивное напряжение образцов площадью S , $U_{m\text{ср}}$ — то же для образцов площадью $S_m = mS$, σ и σ_m — соответственно среднеквадратичные отклонения. Эти параметры связаны соотношениями:

$$U_{\text{ср}} - U_{m\text{ср}} = a\sigma; \quad (3-29)$$

$$\sigma_m = b\sigma, \quad (3-30)$$

где a и b являются функциями m (их значения приведены в табл. 3-1).

Таблица 3-1

Значения параметров a и b

m	1	10	10^2	10^3	10^4
a	0	1,54	2,5	3,25	3,85
b	1	0,59	0,43	0,35	0,3

Как видно из (3-29), (3-30) и табл. 3-1, с ростом площади диэлектрика S уменьшается не только среднее пробивное напряжение, но и σ_m .

3-3. ЗАВИСИМОСТЬ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ, ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

В диапазоне рабочих температур силовых конденсаторов значение $E_{\text{пр}}$ их изоляции несколько изменяется с изменением температуры. Для бумажно-масляного

диэлектрика $E_{пр}$ различного рода напряжений линейно зависит от температуры, снижаясь с повышением температуры во всем рабочем диапазоне температур (от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$). Для бумажного диэлектрика, пропитанного полярными жидкостями, зависимость $E_{пр}$ от температуры в области до дипольного максимума $\text{tg } \delta$ также имеет

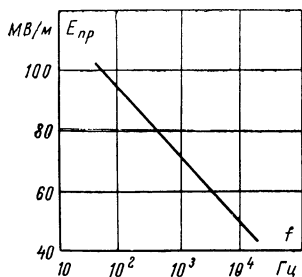


Рис. 3-6. Зависимость кратковременной электрической прочности бумажно-масляного диэлектрика от частоты.

линейный характер, понижаясь с повышением температуры. Электрическая прочность такого диэлектрика при температурах, соответствующих зоне дипольного максимума, исследована недостаточно. По-видимому, в этом диапазоне следует ожидать снижения $E_{пр}$, так как характеристики частичных разрядов здесь существенно ухудшаются. Имеющиеся данные по температурной зависимости $E_{пр}$ пленочного диэлектрика показывают, что с повышением температуры его прочность также несколько снижается.

Кратковременная электрическая прочность бумажно-масляной изоляции снижается с увеличением частоты воздействующего напряжения. Подобная зависимость показана на рис. 3-6 [Л. 1-9]. Ход этой зависимости можно объяснить влиянием частичных разрядов в предпробивной период, интенсивность которых при прочих равных условиях увеличивается с ростом частоты. При воздействии несинусоидального напряжения электрическая прочность $E_{пр}$ обычно определяется как отношение действующего значения пробивного несинусоидального напряжения к толщине диэлектрика. Однако определенная таким образом $E_{пр}$ не всегда правильно характеризует электрическую прочность изоляции, так как на ее значение существенное влияние может оказывать амплитудное значение напряжения.

Форма напряжения зависит от гармонических составляющих и их начальных фаз. Изменением начальных фаз гармоник можно изменять форму напряжения, т. е. изменять ее наибольшее мгновенное значение или амплитуду без изменения действующего значения. Наличие пиков в несинусоидальной кривой может влиять на дли-

тельную электрическую прочность. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании конденсаторов для работы при несинусоидальном напряжении.

Электрическая прочность бумажно-масляного диэлектрика при пульсирующем напряжении $E_{\text{пр.пул}}$, содержащем постоянную $E_{=}$ и переменную $E_{\sim}$ частотой 50 Гц составляющие, зависит от их соотношения

$$\alpha = E_{=}/E_{\sim}, \quad (3-31)$$

изменяясь от значения электрической прочности $E_{\text{пр}}$ на переменном токе ($\alpha=0$) до значения $E_{\text{пр}}$ на постоянном токе ($\alpha=\infty$). Эта зависимость аналитически хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией [Л. 3-9].

$$E_{\text{пр.пул}} = E_{\text{пр}\sim} \cdot \{ (E_{\text{пр}=} - E_{\text{пр}\sim}) (1 - e^{-\alpha/B}) \}, \quad (3-32)$$

где $B=4$ — экспериментальная постоянная.

3.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СЕКЦИИ ПО ЗАКРАИНЕ

Для секции со скрытой фольгой (рис. 1-5) путь перекрытия по закраине равен удвоенному значению ширины закраины l_3 и толщины диэлектрика между обкладками d_c . Для секции с выступающей фольгой путь перекрытия равен сумме ширины закраины l_3 и толщины диэлектрика d_c . Поскольку $d_c \ll l_3$ значением d_c можно пренебречь, при этом расчетный путь перекрытия в первом случае составит $2l_3$, а во втором — l_3 . Необходимо также учитывать, что обычно вывод секции шунтирует закраину с одной стороны. Для расчета ширины закраины необходимо знать зависимость напряжения перекрытия U_p от l_3 . Полученные в [Л. 3-10] теоретические соотношения сложны и мало удобны для практического применения. Более удобной является эмпирическая зависимость

$$U_p = A (\Delta l)^{0.5}, \quad (3-33)$$

где A — экспериментальная постоянная, зависящая от толщины диэлектрика и формы воздействующего напряжения; Δl — общая длина пути перекрытия, см; U_p — напряжение, кВ.

Так, например, для $d=0,1$ мм $A=8$. Для постоянного напряжения значения разрядных напряжений значительно больше, чем для переменного, и весьма слабо зависят от толщины диэлектрика (см. рис. 3-7, [Л. 3-11]).

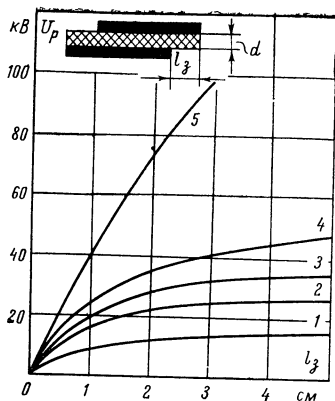


Рис. 3-7. Разрядное напряжение (амплитудное значение вдоль закраин при переменном (1—4) и постоянном (5) напряжении.

1 — $d_c = 8 \times 12$ мкм; 2 — $d_c = 5 \times 50$ мкм; 3 — $d_c = 10 \times 50$ мкм; 4 — $d_c = 9 \times 120$ мкм.

Напряжение перекрытия по закраине U_p выбирается по значению $U_{исп}$, взятому с некоторым запасом, который учитывается коэффициентом запаса $k_3 > 1$. Значение k_3 различно в разных конкретных случаях. Используя (3-33) и полагая $\Delta l = l_3$, можно рассчитать ширину закраины l_3 . Для секции со скрытой фольгой имеем:

$$l_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{k_3 U_{исп}}{A} \right)^2 \quad (3-34)$$

и секции с выступающей фольгой

$$l_3 = \left(\frac{k_3 U_{исп}}{A} \right)^2. \quad (3-35)$$

К полученным из расчета значениям l_3 добавляется 1,5—2,5 мм, учитывающие несовпадение краев фольги при намотке, а также на допуск по ширине фольги и бумаги. Минимальное значение l_3 должно быть не менее 5—7 мм.

Глава четвертая

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В ИЗОЛЯЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ

4-1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Понятие частичных разрядов (ЧР) в изоляции охватывает местные разряды на поверхности или внутри изоляции, не приводящие к полному пробое межэлектродного промежутка, которые могут быть в виде короны, скользящих разрядов или частичных пробоев отдельных элементов изоляции [Л. 4-1]. Частичные разряды приводят к разложению жидкого и твердого компонента изоляции за счет энергии, выделяющейся при разрядах. В связи с этим характеристики частичных разрядов являются определяющими для выбора допустимых рабочих и испытательных напряженностей и при оценке сроков службы конденсаторов, работающих на переменном и импульсном напряжениях.

Частичные разряды в изоляции могут возникать в местах с пониженной электрической прочностью (например, в прослойках пропитываемой жидкости или в газовых включениях в толще диэлектрика). В дальнейшем для обоих случаев элемент диэлектрика, участвующий в частичных разрядах, будет называться «включением».

Каждый из единичных частичных разрядов сопровождается прохождением через включение определенного заряда q и приводит к изменению напряжения на внешних электродах всего образца на некоторое значение ΔU_x . Эквивалентная схема диэлектрика может

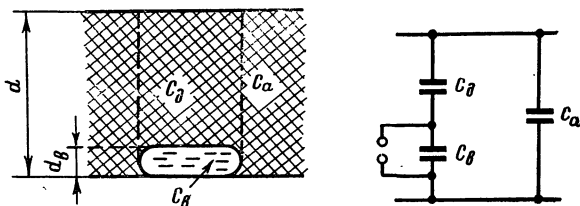


Рис. 4-1. Схема замещения диэлектрика при ЧР.

быть представлена тремя емкостями (рис. 4-1), где C_b — емкость элемента диэлектрика, участвующего в частичном разряде (емкость включения), C_d — емкость элемента диэлектрика, включенного последовательно с первым, C_a — емкость остальной части диэлектрика, лишенной включений. При этом $C_x = C_a + C_b C_d / (C_b + C_d)$.

Поскольку $C_x \gg C_b$ и $C_x \gg C_d$, то заряд, проходящий через включение в момент возникновения частичных разрядов, равен:

$$q = (C_b + C_d) (U_{в.з} - U_{в.п}) = (C_b + C_d) \Delta U_b, \quad (4-1)$$

где $U_{в.з}$ — напряжения зажигания разряда во включении; $U_{в.п}$ — напряжение погасания разряда во включении.

Можно представить, что изменение напряжения ΔU_x на образце происходит вследствие фиктивного изменения заряда на зажимах образца, причем $\Delta U_x = q_{ч.р} / C_x$. Значение $q_{ч.р}$ называется кажущимся зарядом ЧР. Для установления соотношения между q и $q_{ч.р}$ примем во внимание, что при возникновении ЧР и уменьшении напряжения на емкости C_b на ΔU_b из емкости C_a ушел заряд на подзарядку емкости C_d . Используя условия равенства этих зарядов, имеем:

$$q_{ч.р} = \Delta U_x C_x = \Delta U_b C_d = q C_d / (C_d + C_b). \quad (4-2)$$

Возникновение ЧР и связанное с этим изменение напряжения на образце приводят к появлению высокочастотных колебаний в схеме, к которой подключен образец. Регистрация этих высокочастотных колебаний специальными измерительными устройствами позволяет исследовать ЧР в изоляции.

Для оценки интенсивности ЧР может быть принято произведение среднего значения заряда $q_{ч.р}$ на среднее число импульсов в секунду $n_{ч.р}$, которое называется током частичных разрядов $I_{ч.р}$:

$$I_{ч.р} = q_{ч.р} n_{ч.р}. \quad (4-3)$$

При постепенном повышении напряжения на испытуемом объекте при некотором значении напряжения в изоляции появляются ЧР слабой интенсивности (порядка 10^{-14} — 10^{-12} Кл). При выдержке напряжения в пределах десятков минут эти ЧР могут прекращаться на некоторый промежуток времени и появляться снова. При снижении напряжения до напряжения возникновения эти процессы прекращаются. Особенность рассматриваемого вида ЧР состоит в том, что их появление при кратковременном воздействии не приводит к заметному разрушению изоляции и снижению напряжения возникновения ЧР. Длительное существование таких ЧР определенной интенсивности (в течение тысячи часов и более) приводит к относительно медленному разрушению диэлектрика и вызывает рост его $\tan \delta$. Такие разряды называются начальными. Если дальше повышать напряжение, то при некотором его значении интенсивность разрядов резко возрастает. Появление ЧР большой интенсивности (порядка 10^{-10} — 10^{-9} Кл) приводит к быстрому разрушению некороностойкой изоляции. Такие ЧР называются критическими [Л. 4-2, 4-3]. Для названных выше видов ЧР принято оценивать следующие их параметры: напряжение начальных ЧР U_n — наименьшее напряжение существования ЧР слабой интенсивности или короны, не приводящих к заметному разрушению некороностойкой изоляции или уменьшению напряжения ЧР при кратковременном воздействии; напряжение критических частичных разрядов $U_{кр}$ — наименьшее напряжение существования ЧР значительной интенсивности или скользящих разрядов, способных вызвать быстрое заметное разрушение некороностойкой изоляции.

Для каждого из перечисленных видов ЧР характерно свое напряжение зажигания (возникновения) и напряжение погасания.

Начальные ЧР в силовых конденсаторах в подавляющем большинстве случаев представляют собой пробои прослоек жидкого диэлектрика, так как в хорошо высушенной и пропитанной изоляции нет пузырьков воздуха или какого-либо другого газа. Пропитка изоляции производится обычно при остаточном давлении 1 — 10^{-2} Па, в результате чего в изоляции остается 10^{-5} — $10^{-3}\%$ газа (воздуха). Растворимость воздуха в жидких диэлектриках при 20°C составляет около 10% по объему, поэтому весь оставшийся газ будет растворен в пропитывающем составе. Газовые включения могут образоваться лишь при интенсивном разложении масла ЧР в изоляции конденсатора, при котором скорость газообразования превышает скорость диффузии образовавшегося газа из очага частичных разрядов в окружающую жидкую фазу.

4-2. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

При приложении синусоидального напряжения ЧР произойдет тогда, когда напряжение на включении (рис. 4-1, емкость C_v) достигнет пробивного значения $U_{в.з}$ (напряжение зажигания разряда во включении). Характерные осциллограммы ЧР при переменном напряжении приведены на рис. 4-2.

При пробое емкости C_v ионы, образующиеся в процессе разряда, заряжая поверхность включения, создают

поле, по направлению обратное основному. Так как в этих условиях после разряда емкости включения C_B нет большой плотности тока, необходимой для поддержания устойчивого разряда, то он гаснет. Последовательно соединенный с включением диэлектрик (емкость C_d) допускает наличие лишь небольшой плотности тока (10^{-4} А/см² при $E=10^6$ В/см). Образование на поверхности включения полупроводящего слоя также не может

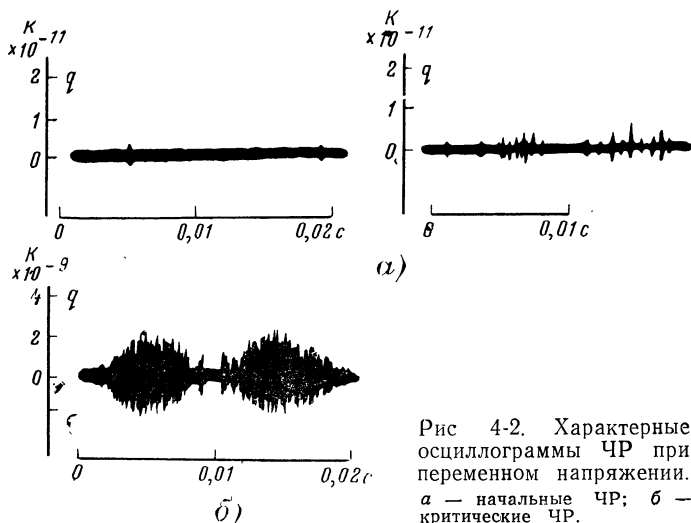


Рис 4-2. Характерные осциллограммы ЧР при переменном напряжении. а — начальные ЧР; б — критические ЧР.

привести к поддержанию разряда вследствие незначительной емкости включения. При разряде напряжение на включении падает не до нуля, а до $U_{B.П}$ (напряжение погасания разряда во включении). Значение $U_{B.П}$ при размерах газового включения или прослойки пропитывающей жидкости около 10 мкм ненамного меньше соответствующего напряжения зажигания. Обычно $U_{B.П} = (0,9 \div 0,7) U_{B.З}$. После погасания разряда напряжение на включении начинает нарастать от значения $U_{B.П}$ по закону, соответствующему изменению приложенного напряжения, смещенному по вертикали на значение постоянной составляющей, возникшей вследствие появления зарядов на поверхности включения (на емкости C_B). Когда напряжение U_B на емкости C_B достигнет $U_{B.З}$, процесс повторяется.

Следовательно, разряды в рассматриваемой области диэлектрика повторяются через промежутки времени, соответствующие изменению напряжения на C_B на значение $U_{B.3} - U_{B.п.}$ При прохождении напряжения через максимум включение находится под напряжением, значение которого лежит в интервале между $U_{B.3}$ и $U_{B.п.}$ Затем происходит уменьшение напряжения на включении до 0

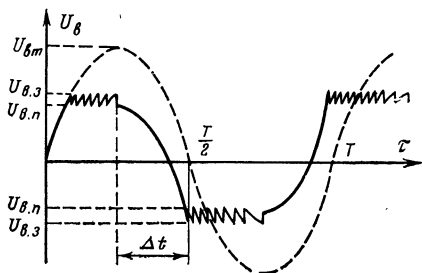


Рис. 4-3. Развитие во времени частичных разрядов при переменном напряжении.

и дальнейший рост до $U_{B.3}$. В первом приближении можно принять, что при обеих полярностях пробивное напряжение включения одинаковое. При достижении напряжением на включении значения $U_{B.3}$ происходит пробой включения и процесс продолжается описанным выше образом (рис. 4-3).

При таком механизме явления ЧР должны прекращаться при прохождении напряжения через максимум и вновь возникать после изменения напряжения на изоляции на значение ΔU_1 , соответствующее изменению напряжения на включении на $\Delta U_{B1} = U_{B.3} + U_{B.п.}$, причем ΔU_1 и ΔU_{B1} связаны соотношением

$$\Delta U_1 = \frac{1}{\eta} (U_{B.3} + U_{B.п.}) = \frac{\Delta U_{B1}}{\eta}, \quad (4-4)$$

где

$$\eta = C_d / (C_d + C_B). \quad (4-5)$$

Если приложенное к изоляции напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то напряжение на включении равно

$$u_B = u C_d / (C_B + C_d) = u \eta. \quad (4-6)$$

Тогда число разрядов во включении за один полупериод равно:

$$m = \frac{2U_{Bm} - (U_{B.3} + U_{B.п.})}{U_{B.3} - U_{B.п.}} = \frac{2U_m - (U_3 + U_{п.})}{U_3 - U_{п.}}, \quad (4-7)$$

где U_3 и $U_{п.}$ — напряжение на образце при зажигании и погасании разрядов во включении.

При этом число разрядов во включении за 1 с составит:

$$n_{\text{ч.р}} = 2fm, \quad (4-8)$$

где f — частота переменного напряжения.

Энергию, рассеиваемую во включении при ЧР, можно определить по разности начальной $W_{\text{н}}$ и конечной $W_{\text{к}}$ энергии, запасаемой на емкости включения $C_{\text{в}}$. С учетом того, что $U_{\text{в.з}} - U_{\text{в.п}} \ll U_{\text{в.з}}$, имеем:

$$\begin{aligned} W_{\text{ч.р}} &\approx W_{\text{н}} - W_{\text{к}} = \frac{C_{\text{в}} + C_{\text{д}}}{2} (U_{\text{в.з}}^2 - U_{\text{в.п}}^2) \approx \\ &\approx (C_{\text{в}} + C_{\text{д}}) U_{\text{в.з}} (U_{\text{в.з}} - U_{\text{в.п}}) = qU_{\text{в.з}} = q_{\text{ч.р}} U_{\text{з}}. \end{aligned} \quad (4-9)$$

Учитывая (4-7) и (4-9), потери на ЧР в единицу времени (мощность, расходуемая на ЧР) $P_{\text{ч.р}}$ в одном включении при частоте переменного тока f могут быть представлены в виде

$$P_{\text{ч.р}} = W_{\text{ч.р}} n_{\text{ч.р}} = 2f (C_{\text{в}} + C_{\text{д}}) U_{\text{в.з}} [2U_{\text{вм}} - (U_{\text{в.з}} + U_{\text{в.п}})]. \quad (4-10)$$

Из (4-10) следует, что при фиксированном количестве одинаковых включений потери на ЧР линейно возрастают с ростом приложенного напряжения.

В конденсаторной изоляции ЧР при переменном напряжении возникают прежде всего у края электрода, где имеется повышенная напряженность электрического поля. Вначале ЧР появляются на краю электрода в отдельных точках. С ростом напряжения количество точек растет, захватывая весь периметр электрода. Учет увеличения с ростом напряжения числа областей, где происходят ЧР, приводит к следующей зависимости тока $I_{\text{н}}$ и мощности $P_{\text{н}}$ начальных ЧР от напряжения [Л. 4-4]:

$$I_{\text{н}} = q_{\text{н}} n_{\text{н0}} (U/U_{\text{н}})^{a_1} = I_{\text{н0}} (U/U_{\text{н}})^{a_1}; \quad (4-11)$$

$$P_{\text{н}} \approx I_{\text{н}} U = P_{\text{н0}} (U/U_{\text{н}})^{a_1+1} = P_{\text{н0}} (U/U_{\text{н}})^a, \quad (4-12)$$

где $n_{\text{н0}}$, $I_{\text{н0}}$ и $P_{\text{н0}}$ — значения соответствующих характеристик начальных ЧР при напряжении $U_{\text{н}}$, ниже которого вероятность их возникновения достаточно мала (не превышает $3 \cdot 10^{-5}$). Полученные выражения достаточно хорошо подтверждаются опытным путем. Экспериментально было установлено для бумажно-масляной изоля-

ции в [Л. 2-27, 4-6]

$$I_H = q_H n_{ч.р} = A_1 U^{a_1}; \quad (4-13)$$

$$P_H = I_H U = A_2 U^a = A_3 E^a, \quad (4-14)$$

где $a = a_1 + 1$ колеблется от 5 до 8 ($a \approx 6$). Характерные зависимости I_H и $n_{ч.р}$ от напряжения приведены на рис. 4-4. Характер зависимости интенсивности ЧР от на-

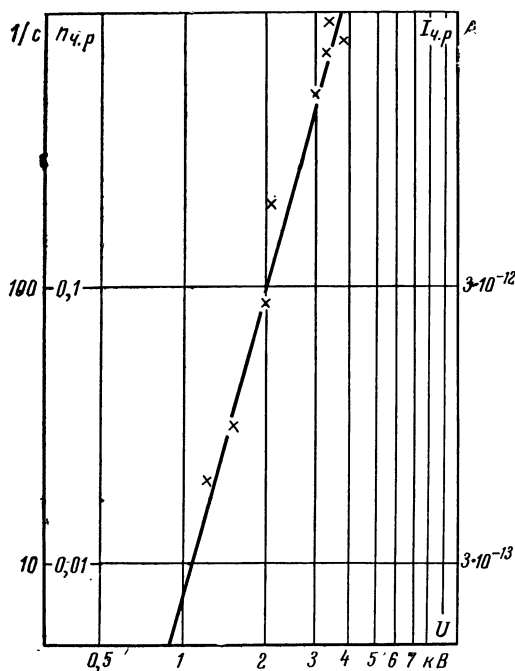


Рис. 4-4. Зависимость интенсивности ЧР $n_{ч.р}$, $I_{ч.р}$ от напряжения на образце с толщиной изоляции 80 мкм.

пряженности электрического поля E не изменяется при изменении толщины диэлектрика.

Переход начальных ЧР в критические для слоистой изоляции, пропитанной жидким диэлектриком, связан либо с возникновением скользящих разрядов на краю фольги, либо с возникновением в толще изоляции газовых включений за счет разложения жидкого диэлектрика разрядами. Последнее наиболее сильно проявляется в изоляции, пропитанной нефтяным маслом.

Рассмотрим особенности развития ЧР в изоляции, пропитанной нефтяным маслом. При наличии разрядов в изоляции возникает разложение жидкого диэлектрика с образованием газообразных продуктов. Одновременно происходит непрерывное поглощение образующихся газов как за счет растворения газа в жидком диэлектрике, так и за счет химического связывания газа (в основном водорода). Последнее наиболее сильно сказывается в жидкостях, в составе которых имеются непредельные углеводороды. Когда интенсивность газовыделения (газовыделение в единицу времени) превосходит интенсивность поглощения газов, возникают условия для образования газовых пузырьков. Вследствие пробоев, происходящих в этих пузырьках, происходит резкое возрастание интенсивности ЧР на 2—3 порядка (возникновение критических ЧР), что приводит к дальнейшему росту этих пузырьков и существенному понижению напряжения возникновения ЧР [Л. 3-2, 4-7].

Растворимость газа в жидком диэлектрике равна:

$$C_r = V_r / V_{ж}, \quad (4-15)$$

где C_r — растворимость газа в жидком диэлектрике; V_r — объем газа, приведенный к нормальным условиям; $V_{ж}$ — объем жидкого диэлектрика.

Предельная растворимость различных газов в нефтяном масле приведена в табл. 4-1 [Л. 3-2].

Таблица 4-1

**Предельная растворимость газа в нефтяном масле
(насыщенный раствор при 20°C и атмосферном давлении)**

Газ	Содержание газа в масле, % (объема)
Воздух	10
Азот	8,56
Кислород	15,9
Водород	4
Углекислота	125
Азот как часть воздуха	6,98
Кислород как часть воздуха	3,03

Количество газа, растворенного в единицу времени, может быть определено из соотношения

$$h_r = dH_r / d\tau = \beta (H_0 - H_r), \quad (4-16)$$

где H_0 — максимальное количество газов, которое может быть поглощено данным объемом жидкого диэлектрика; H_τ — количество газов, уже поглощенных к моменту времени τ ; β — коэффициент, характеризующий скорость газопоглощения. Например, для воздуха в нефтяном масле

$$H_0 = C_{\Gamma} V_{\text{ж}} = 0,1 V_{\text{ж}} P / 760, \quad (4-17)$$

где P — давление воздуха окружающей среды.

Количество газов, выделяемое в 1 с в процессе развития частичных разрядов, пропорционально потерям на эти разряды

$$h_{\text{ч.р}} = B P_{\text{ч.р}} = B W_{\text{ч.р}} n_{\text{ч.р}}, \quad (4-18)$$

где B — удельное количество газов, выделяющихся при разложении жидкого диэлектрика частичными разрядами с энергией 1 Дж.

Критические ЧР возникают при условии

$$h_{\text{ч.р}} \geq h_{\tau}. \quad (4-19)$$

В области критических ЧР количество поглощенных газов определяется только растворяющей способностью жидкого диэлектрика:

$$H_{\tau} = \int_0^{\tau} h_{\tau} d\tau = H_0 (1 - e^{-\beta\tau}), \quad (4-20)$$

$$h_{\tau} = \beta H_0 e^{-\beta\tau}. \quad (4-21)$$

В режиме критических ЧР в бумажно-масляной изоляции снижение их напряжения до минимального значения происходит за время, исчисляемое долями секунд или секундами (рис. 4-5). При таких временах

$$e^{-\beta\tau} \approx 1 \text{ и } h_{\tau} \approx \beta H_0. \quad (4-22)$$

При этом условие возникновения критических разрядов имеет вид:

$$h_{\text{ч.р}} \geq \beta H_0. \quad (4-23)$$

В области начальных ЧР все выделяющиеся при ЧР газы поглощаются маслом, т. е.

$$H_{\tau} = h_{\text{ч.р}} \tau \text{ и } h_{\tau} = \beta (H_0 - h_{\text{ч.р}} \tau). \quad (4-24)$$

Из (4-24) следует, что в режиме начальных ЧР в герметичном объеме имеет место непрерывное уменьшение

h_{τ} . Поэтому должен наступить момент, когда будет выполнено (4-19) и режим начальных ЧР перейдет в режим критических ЧР. Время, необходимое для такого перехода, находится из совместного решения (4-19) и (4-24):

$$h_{\text{ч.р}} = \beta (H_0 - h_{\text{ч.р}} \tau),$$

откуда

$$\tau = (\beta H_0 - h_{\text{ч.р}}) / \beta h_{\text{ч.р}}. \quad (4-25)$$

Характерная зависимость времени снижения напряжения ЧР до минимального значения от приложенного напряжения, вычисленная по (4-25) при $U_{\text{кр}} = 2U_{\text{н}}$, приведена на рис. 4-5. Если после снижения напряжения критические ЧР в процессе дальнейшей работы не имеют

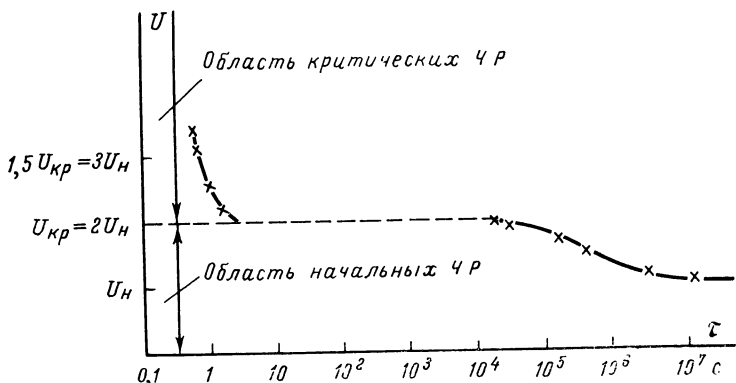


Рис. 4-5. Зависимость времени снижения напряжения критических ЧР до минимального значения от приложенного напряжения при $U_{\text{кр}} = 2U_{\text{н}}$.

места или изоляция не находится под напряжением, то образовавшиеся газовые включения растворяются в масле и напряжение ЧР увеличивается.

Изложенный характер и закономерности протекания ЧР относятся к бумажно-масляной изоляции. При пропитке бумажного конденсаторного диэлектрика хлордифенилами или их смесями характер развития и протекания процессов имеет некоторые специфические особенности. Хлордифенилы при разложении под воздействием ЧР не выделяют такого количества газов, как это имеет место при пропитке нефтяным маслом, благодаря чему напряжение возникновения ЧР не снижается. Однако

под воздействием ЧР из хлордифенилов выделяется углерод в виде сажи и хлористый водород, что способствует разрушению твердого диэлектрика. В целом, однако, рост интенсивности ЧР и разрушение твердой фазы конденсаторного диэлектрика с хлорированной пропиткой происходит значительно медленнее, чем диэлектрика с пропиткой нефтяным маслом. Если бумажно-хлордифениловый диэлектрик довести до возникновения в нем критических

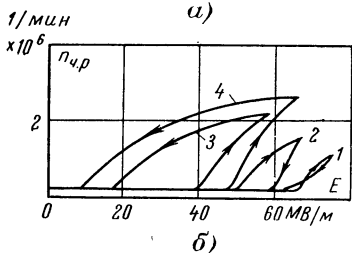
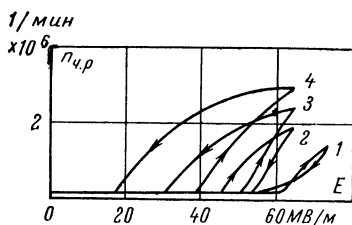


Рис. 4-6. Зависимость интенсивности критических ЧР от напряженности электрического поля при подъеме и снижении напряжения.

а — бумажные конденсаторы с пропиткой МГ-15; *б* — бумажные конденсаторы с пропиткой пентахлордифенилом, 1 — $t=90^{\circ}\text{C}$; 2 — $t=50^{\circ}\text{C}$; 3 — $t=20^{\circ}\text{C}$; 4 — $t=0^{\circ}\text{C}$.

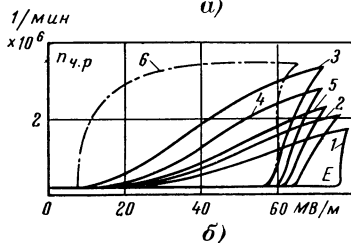
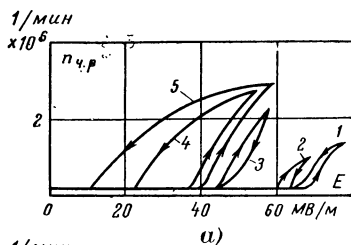


Рис. 4-7. Зависимость интенсивности критических ЧР от напряженности электрического поля при подъеме и снижении напряжения.

а — бумажные конденсаторы с пропиткой трихлордифенилом; *б* — бумажные конденсаторы с пропиткой МГТ-45; 1 — $t=80^{\circ}\text{C}$; 2 — $t=50^{\circ}\text{C}$; 3 — $t=20^{\circ}\text{C}$; 4 — $t=0^{\circ}\text{C}$; 5 — $t=-20^{\circ}\text{C}$; 5 — пропитка нефтяным маслом.

ЧР и оставить его при этом напряжении, то через некоторое время ЧР прекратятся. Причина этого заключается в том, что выделяющийся при разложении хлордифенилов углерод шунтирует очаг ЧР и гасит разряды, чему благоприятствует также малое газовыделение при разложении хлордифенилов и их большая газопоглощающая способность. Для того чтобы вновь вызвать появление критических ЧР, нужно повысить напряжение против

прежнего уровня. При этом процесс опять пойдет так, как описано выше.

Затухание ЧР особенно заметно при вязкости жидкостей ниже $5 \cdot 10^{-3}$ м²/с. На рис. 4-6 и 4-7 [Л. 4-9] приведена интенсивность ЧР конденсаторов, пропитанных различными жидкостями в зависимости от напряженности электрического поля при разных температурах. Как видим, с повышением температуры (снижением вязкости) затухание ЧР происходит при меньшем снижении напряженности, т. е. быстрее. При кинематической вязкости хлорированных жидкостей ниже $5 \cdot 10^{-3}$ м²/с неоднократные, быстро следующие друг за другом повышения напряженности до уровня возникновения ЧР не приводят к снижению напряженности ЧР. Опыты показали, что конденсаторы, пропитанные хлордифенилом, работают без выхода из строя более 10^3 ч при напряженности критических ЧР, тогда как конденсаторы с пропиткой нефтяным маслом в таком режиме работают 1—6 ч.

4-3. ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ОТ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИКА

Для изоляции, находящейся в сильно неоднородном поле, толщина диэлектрика d_c определяет значение напряжения U_n и средней напряженности $E_n = U_n/d_c$ начала развития местных разрядов, которые характеризуют электрическую прочность изоляции в области острого края электрода. В соответствии с (3-1)—(3-4) средняя

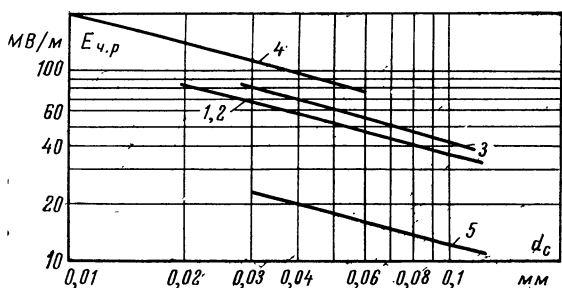


Рис. 4-8. Зависимости напряженности критических (1—4) и начальных (5) ЧР от толщины диэлектрика.

1 и 5 — бумага КОН-1, пропитка конденсаторным маслом; 2 — бумага КОН-1, пропитка трихлордифенилом; 3 — полипропилено-бумажная изоляция, пропитка трихлордифенилом; 4 — полипропиленовая пленка, пропитка трихлордифенилом.

напряженность возникновения начальных ЧР определяется (3-5). Эта формула хорошо подтверждается экспериментально. На рис. 4-8 приведены зависимости напряженностей критических и начальных ЧР от толщины для различных видов диэлектрика. Эти зависимости могут быть представлены эмпирическими формулами, в которых показатель степени при d_c близок к 0,5. Зависимости напряженности начальных ЧР с интенсивностью на уровне 10^{-15} — 10^{-14} Кл от толщины диэлектрика для средних значений равны [Л. 4-6]:

$$E_n = 3,6 d_c^{-0,5} \text{ МВ/м}, \quad (4-26)$$

где d_c — толщина изоляции, мм ($0,03 \leq d_c \leq 1,0$ мм).

Разброс значений E_n характеризуется среднеквадратичным отклонением $\sigma \approx 0,1 E_n$.

Зависимости напряженности критических ЧР от толщины диэлектрика для бумаги КОН-I, пропитанной конденсаторным маслом или трихлордифенилом, имеют вид:

$$E_{кр} = 9,5 d_c^{-0,58}, \quad (4-27)$$

где d_c — толщина изоляции, мм; $E_{кр}$ — средняя напряженность электрического поля, МВ/м. Разброс напряженности критических ЧР для отдельных образцов характеризуется среднеквадратичным отклонением $\sigma_{кр}/E_{кр} \approx 0,07 \div 0,1$. При неизменной толщине диэлектрика изменение количества слоев (например, увеличение количества листов бумаги с соответствующим уменьшением толщины одного листа) не приводит к изменению напряженности ЧР.

Напряженности критических ЧР для полипропиленобумажной (50% пленки) изоляции, пропитанной трихлордифенилом, на 20% выше, а для полипропиленовой изоляции с пропиткой трихлордифенилом на 35% выше, чем для бумажной изоляции [Л. 4-10]. Это объясняется главным образом уменьшением диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика ϵ , так как в соответствии с [Л. 3-2] напряженность ЧР должна изменяться пропорционально $1/\sqrt{\epsilon}$.

Несколько иные зависимости от толщины имеют место для изоляции с воздушными включениями. Такие включения могут образоваться в результате неправильного технологического процесса изготовления изоляции, неправильной эксплуатации, а также в результате воз-

действия перенапряжений и развития ЧР (например, хотя бы кратковременного существования критических ЧР). Для изоляции с резко неоднородным полем и газовыми включениями зависимость напряженности ЧР от толщины диэлектрика также определяется процессами на краю электродов и соответствует (3-5). Для изоляции со слабо неоднородным или однородным полем и газовыми включениями эти соотношения могут быть получены из рассмотрения эквивалентной схемы диэлектрика с газовым включением согласно рис. 4-1. В этом случае напряженность начальных ЧР равна [Л. 1-1]:

$$E_n = \frac{U_{в.з}}{\epsilon_d d_B} \left[\epsilon_B + \frac{(\epsilon_d - \epsilon_B) d_B}{d_c} \right], \quad (4-28)$$

где $\epsilon_B \approx \epsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость газа; ϵ_d — диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Выражение (4-28) показывает, что при неизменных размерах включения напряженность ЧР в области однородного поля падает с ростом толщины диэлектрика, однако зависимость E_n от d_c в этом случае значительно слабее, чем в сильно неоднородном поле.

4-4. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Зависимость характеристик частичных разрядов от частоты приложенного напряжения. Повышение частоты приложенного напряжения не изменяет характера зависимости мощности ЧР $P_{ч.р}$ от напряженности электрического поля, однако приводит к увеличению интенсивности ЧР, что можно объяснить увеличением числа полупериодов, а следовательно, и числа $n_{ч.р}$ разрядов в 1 с (рис. 4-3). Однако увеличение $P_{ч.р}$ и $n_{ч.р}$ с ростом частоты происходит не пропорционально частоте, как это следует из (4-10) и (4-8), а несколько слабее (рис. 4-9). На основании экспериментальных данных была установлена следующая зависимость [Л. 4-11]:

$$P_{ч.р} = A_3 f^{0,62}. \quad (4-29)$$

В диапазоне до 1 кГц электрическая прочность газовых включений и масляных прослоек практически не зависит от частоты [Л. 4-5]. Кроме того, распределение переменного напряжения по толщине изоляции и на краю электрода (при удельном поверхностном сопротивлении

$\rho_s > 10^{11}$ Ом) определяется соответствующими значениями диэлектрической проницаемости, которые для частоты до 10 кГц в большинстве случаев слабо зависят от частоты. Поэтому в области частот до 10^5 Гц напряженность начальных ЧР практически не зависит от частоты.

отн. ед.

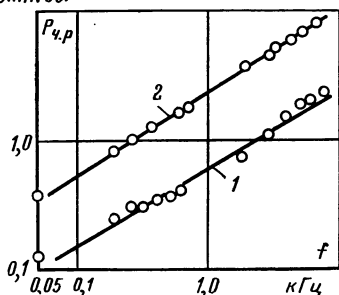


Рис. 4-9. Зависимость мощности ЧР от частоты приложенного напряжения ($d_c = 30$ мкм).
1 — $E = 40$ МВ/м; 2 — $E = 50$ МВ/м.

Если начальные ЧР в изоляции возникают в результате пробоя масляных пленок, то в этом случае при частотах более 10^5 Гц необходимо учитывать снижение электрической прочности масла с ростом частоты. Например, при повышении частоты от 50 до 10^6 Гц прочность конденсаторного масла снижается примерно на 30%. Указанное обстоятельство приводит к соответствующему снижению напряжения начальных ЧР.

Напряженность критических ЧР существенно зависит от частоты приложенного напряжения. Если возникновение критических ЧР определяется условием (4-19), что имеет место для изоляции, пропитанной нефтяным маслом, то при различных частотах это условие имеет вид:

$$h_{ч.рf} = h_{ч.р50}, \quad (4-30)$$

где $h_{ч.р50}$ и $h_{ч.рf}$ — интенсивность газовыделения в единицу времени при напряжении частотой 50 Гц и f , поскольку интенсивность газопоглощения от частоты приложенного напряжения не зависит. Тогда, используя (4-10) и (4-18), получаем [Л. 4-7]:

$$\begin{aligned} h_{ч.рf} &= P_{ч.р} B = 2f B C_B U_{в.з} [2U_{вм} - (U_{в.з} + U_{в.п})] = \\ &= 2f B C_B U_3 \eta^2 [2U_m - (U_3 + U_{п})]. \end{aligned} \quad (4-31)$$

Условие (4-30) для критических ЧР можно представить следующим образом:

$$2U_{крf} - (U_3 + U_{п}) = \frac{50}{f} [2U_{кр} - (U_3 + U_{п})], \quad (4-32)$$

где $U_{крf}$ — напряжение критических ЧР при частоте f ; $U_{кр}$ — напряжение критических ЧР при частоте 50 Гц.

Из формулы (4-32) находим:

$$U_{крf} = \frac{50}{f} \left(U_{кр} - \frac{U_3 + U_n}{2} \right) + \frac{U_3 + U_n}{2} \approx \approx \frac{50}{f} (U_{кр} - U_n) + U_n \quad (4-33)$$

(так как $U_3 \approx U_n \approx U_n$).

Таким образом, при достаточно больших частотах напряжение критических ЧР стремится к значению начальных ЧР. Расчетная зависимость, вычисленная по (4-33) для изоляции толщиной 80 мкм из конденсаторной бумаги, пропитанной нефтяным маслом, совпадающая с аналогичной опытной зависимостью, приведена

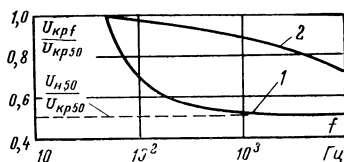


Рис. 4-10. Зависимость напряжения критических ЧР от частоты приложенного напряжения для бумажной изоляции. 1 — пропитка конденсаторным маслом; 2 — пропитка трихлордифенилом.

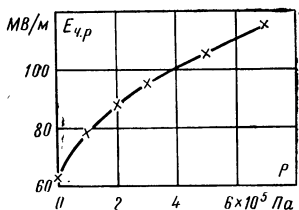


Рис. 4-11. Зависимость напряженности критических ЧР от давления масла.

на рис. 4-10; при $f > 1$ кГц напряжение критических ЧР практически не отличается от напряжения начальных ЧР. Для изоляции с пропиткой хлордифенилами зависимость напряжения критических ЧР от частоты заметно слабее вследствие большей стойкости этих жидкостей к газовыделению в электрическом поле (рис. 4-10).

Зависимость характеристик ЧР от избыточного давления пропитывающего состава. Повышение избыточного давления пропитывающего состава приводит к увеличению напряжения ЧР. Такое влияние избыточного давления сказывается при ЧР, являющихся результатом пробоев как прослойки жидкого диэлектрика, так и газовых включений. В первом случае с ростом избыточного давления увеличивается электрическая прочность жидкости. Это увеличение имеет место как для дегазированного, так и для недегазированного жидкого диэлектрика, хотя для дегазированного диэлектрика зависимость несколько

слабее. Во втором случае с ростом давления увеличивается прочность газового включения. Пробои газовых включений возможны, когда размеры их достаточно велики и достигают 10 мкм и более. Для включений таких размеров с повышением избыточного давления пробивное напряжение возрастает.

На рис. 4-11 приведена зависимость $E_{кр}$ от избыточного давления масла [Л. 4-12]. Анализ кривой рис. 4-11 показывает, что напряжение критических ЧР с ростом давления увеличивается приблизительно во столько же раз, во сколько увеличивается прочность минерального масла. Зависимость напряженности критических ЧР $E_{кр}$ от давления $P_{ж}$ в диапазоне значений $(1-7) \cdot 10^5$ Па для конденсаторной изоляции из бумаги КОИ-I может быть представлена в виде

$$E_{кр} = 65(1 + 0,11 \cdot 10^{-5} P_{ж}), \quad (4-34)$$

где $E_{кр}$ — в МВ/м; $P_{ж}$ — в Па.

Опыт показывает, что повышение избыточного давления сверх определенного значения нерационально, так как приводит к незначительному повышению кратковременной электрической прочности изоляции, что ограничивает допустимые напряженности, при этом выбираемые уже с точки зрения кратковременной прочности и воздействующих перенапряжений. Так, для конденсаторной изоляции с толщиной диэлектрика 50—100 мкм повышение давления рационально до $(6 \div 8) \cdot 10^5$ Па. Обычно конденсаторы с избыточным давлением масла изготавливаются при давлениях до $(3 \div 4) \cdot 10^5$ Па. Уменьшение давления ниже атмосферного может привести к снижению напряжения ЧР [Л. 4-10]. Такое явление может произойти вследствие снижения давления в герметизированном конденсаторе при уменьшении температуры.

Зависимость напряженности ЧР от температуры. Напряженность ЧР в диэлектрике конденсатора зависит от температуры, причем температурное изменение ее различно для пропитки маслом и полярными жидкостями. Для бумажно-масляной изоляции в диапазоне температуры от -40 до $+80^\circ\text{C}$ имеет место весьма слабая тенденция к увеличению напряжения ЧР с ростом температуры (рис. 4-12, кривая 1). Бумажный диэлектрик, пропитанный полярными жидкостями, имеет более сложную температурную зависимость $E_{кр}$, показанную на рис. 4-12, кривые 2—7 [Л. 4-9, 4-13]. Для этой зависи-

мости характерно наличие минимума $E_{кр}$. На частоте 50 Гц минимум $E_{кр}$ имеет место при температуре T_m , превышающей температуру T_d дипольного максимума $\text{tg } \delta$ примерно на 30°C , и совпадающей с температурой минимума $\text{tg } \delta$ [Л. 2-31]. При температуре T_m значение $E_{кр}$ практически вдвое меньше ее значения при $+100^\circ\text{C}$. Изменение $E_{кр}$ бумажного диэлектрика, пропитанного

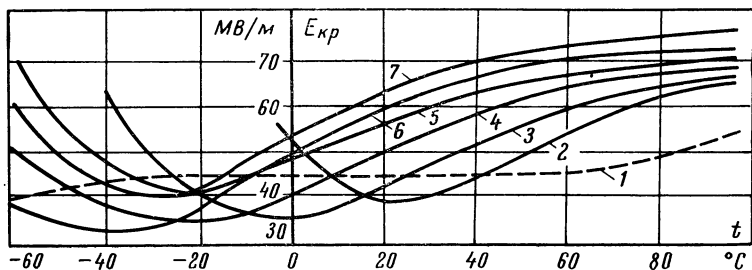


Рис. 4-12. Зависимость напряженности критических ЧР от температуры для бумажной изоляции, пропитанной различными жидкими диэлектриками.

1 — нефтяное конденсаторное масло; 2 — пентахлордифенил; 3 — трихлордифенил; 4 — КЖ1-35; 5 — КЖ2-45; 6 — пирален 1477; 7 — КЖ2-50.

полярной жидкостью, при изменении температуры в пределах от T_d до 373 К ($+100^\circ\text{C}$) хорошо описывается следующим эмпирическим уравнением [Л. 4-14]:

$$E_{кр} = E_{кр0} \left[1 - A_n \left(\frac{T - T_d}{100} \right)^b e^{-c(T - T_d)/100} \right], \quad (4-35)$$

где $E_{кр}$ — напряженность критических ЧР при температуре T ; $E_{кр0}$ — то же при 373 К; A_n , b , c — опытные постоянные, зависящие от свойств жидкости и главным образом от ее температуры застывания.

Изменение температуры от точки T_m в ту или другую сторону имеет следствием увеличение $E_{кр}$. Наличие минимума в температурной зависимости $E_{кр}$ объясняется аналогичным минимумом в зависимости электрической прочности пропитывающих жидкостей от температуры (рис. 4-13) [Л. 4-15]. Несколько более слабый минимум в температурной зависимости наблюдается в конденсаторах с бумажно-пленочным диэлектриком на основе полипропиленовой пленки с пропиткой трихлордифенилом (рис. 4-14) [Л. 4-16].

Зависимость напряжения критических ЧР от формы кривой воздействующего напряжения. Как следует из вы-

ражений (4-7), при синусоидальном напряжении число ЧР за полупериод определяется амплитудой приложенного напряжения и напряжениями зажигания и погасания ЧР. Так как после прохождения напряжения через максимум разряды возникают снова после изменения на-

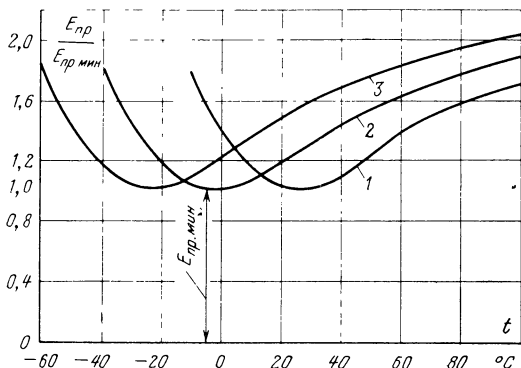


Рис. 4-13. Зависимость электрической прочности пропитывающих жидкостей от температуры.

1 — пентахлордифенил; 2 — трихлордифенил; 3 — КЖ2-45.

пряжения на $\Delta U_1 = U_3 + U_{п}$, то дополнительные ЧР за период возможны, если в кривой воздействующего напряжения имеются провалы глубиной более ΔU_1 . Если в кривой провалов нет или они имеют меньшую глубину,

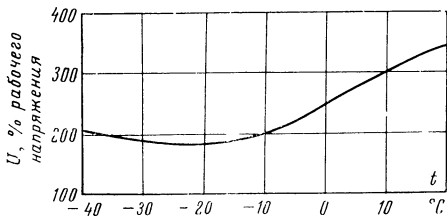


Рис. 4-14. Зависимость напряженности критических ЧР от температуры для пленочно-бумажного диэлектрика; полипропиленовая пленка, пропитка трихлордифенилом.

то число ЧР за полупериод, а следовательно, и напряжение критических ЧР не зависят от формы этой кривой. Напряжение начальных ЧР зависит лишь от амплитуды и в любом случае от формы напряжения не зависит,

Зависимость характеристик ЧР от технологии изготовления. Характеристики ЧР имеют существенную зависимость от технологии изготовления и прежде всего от режима термовакuumной обработки изоляции. Поскольку при изменении режимов термовакuumной обработки изменяется одновременно и остаточное газосодержание и остаточная влажность, то представляет интерес проследить влияние каждого из этих факторов в отдельности на характеристики ЧР на основании результатов специально поставленных опытов.

На рис. 4-15 приведены зависимости напряженности критических ЧР бумажно-масляной изоляции от остаточного давления при влажности бумаги менее 0,1%. Как видно из рис. 4-15, в области давлений до 10 Па для сухой изоляции наблюдается

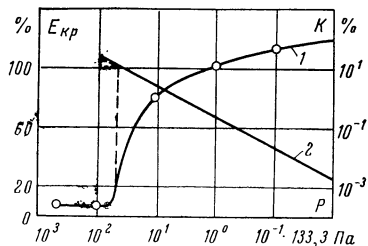


Рис. 4-15. Зависимость напряженности критических ЧР (1) бумажно-масляных конденсаторов и содержания воздуха (2) в масле от остаточного давления при пропитке изоляции

очень слабая зависимость $E_{кр}$ от остаточного давления при пропитке. Пропитка при остаточном давлении выше 10 Па приводит к существенному снижению напряжения критических ЧР; при остаточном давлении более 10^4 Па в изоляции после термовакuumной обработки остаются газовые включения. Следует, однако, считать недопустимым большое количество растворенного воздуха в жидком диэлектрике, так как изменения температуры могут привести к возникновению газовых включений и резкому снижению напряжения ЧР. На рис. 4-16 приведены зависимости E_n и $E_{кр}$ от влагосодержания при пропитке бумажной изоляции конденсаторным маслом и трихлордифенилом [Л. 4-17]. Как показывают приведенные данные, в области влажности бумаги от 0,5 до 7% (по массе) наблюдается сильное снижение напряжения критических ЧР с ростом влажности. Более слабое снижение $E_{кр}$ наблюдается при увеличении влажности от 10^{-3} до 0,5%.

Для бумажно-масляной изоляции не наблюдается заметной зависимости начальных ЧР на уровне 10^{-14} Кл от влажности бумаги и остаточного давления при про-

питке в области давления менее 10^4 Па. Для бумажно-трихлордифениловой изоляции отмечается заметное уменьшение E_n с увеличением влажности. Одновременно с ростом влажности происходит увеличение мощности ЧР. Изменение влажности с 10^{-3} до 2% по массе приводит к увеличению мощности ЧР в 20 раз [Л. 4-17].

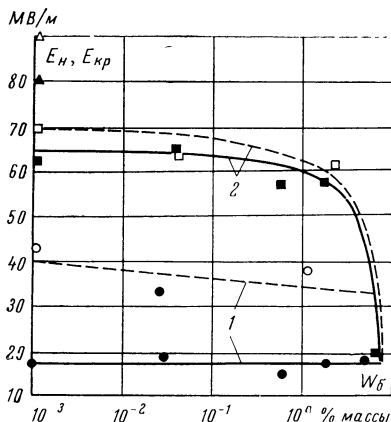


Рис. 4-16. Зависимость напряженностей начальных (1) и критических (2) ЧР от влагосодержания бумаги, пропитанной конденсаторным маслом (сплошные линии) и трихлордифенилом (пунктирные линии).

Приведенные данные показывают, что для получения высоких характеристик ЧР необходимо, чтобы влажность изоляции силовых конденсаторов с бумажно-масляной изоляцией составляла ниже $10^{-1}\%$ (по массе), с бумажно-трихлордифениловой — ниже $10^{-3}\%$. Для этого необходимо в конце термовакуумной обработки обеспечить остаточное давление порядка 0,1 Па. Применение высокого вакуума требуется также для обеспечения низкого $\text{tg } \delta$ и малого остаточного газосодержания изоляции (до $10^{-4}\%$ по объему).

Влияние плотности бумаги на характеристики ЧР. Изменение плотности бумаги вызывает изменение характеристик ЧР. С одной стороны, увеличение плотности бумаги приводит к увеличению электрической прочности листов бумаги вследствие увеличения содержания клетчатки в листе и в результате сокращения размеров элементарных каналов в бумаге, заполненных пропитывающей жидкостью. С другой стороны, увеличение плотности бумаги при $\epsilon_k > \epsilon_{ж}$ приводит согласно (2-1) к росту диэлектрической проницаемости листа бумаги, что при $\epsilon_{ж} < \epsilon_k$ сопровождается увеличением напряженности в прослойках жидкого диэлектрика и приводит к сниже-

нию напряженностей ЧР. Вследствие этого влияние плотности бумаги по-разному сказывается на кратковременной и длительной прочности изоляции.

При определении кратковременной прочности преобладает влияние первого фактора, способствующего ее увеличению с ростом плотности бумаги. При определении длительной прочности, для которой ЧР в прослойках жидкого диэлектрика играют определяющую роль, увеличение плотности бумаги приводит к снижению напряжения (напряженности) ЧР и сокращению срока службы изоляции.

Влияние времени между изготовлением и испытанием. В бумажных конденсаторах напряжение ЧР возрастает в процессе хранения в течение первых 1—2 недель, особенно когда конденсаторы были изготовлены при недостаточно высоком вакууме. Это можно объяснить растворением остаточного воздуха в пропитывающем составе [Л. 4-10], а также диффузией хлорированных жидкостей в полипропиленовую пленку. Для пленочных конденсаторов повышение напряжения ЧР происходит при хранении в течение 5 дней. В [Л. 4-10] для конденсаторов с изоляцией из полипропиленовой пленки, пропитанной трихлордифенилом, для достижения высоких значений напряжения ЧР указывается необходимость хранения минимум в течение 7—24 дней.

4-5. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Эксплуатация изоляции конденсаторов на постоянном напряжении показала, что ЧР в ряде случаев оказывают существенное влияние на старение изоляции. В качестве примера можно указать на различие в сроках службы конденсаторов с твердой и с маловязкой пропиткой. У первых, благодаря наличию газовых полостей и развитию в них интенсивных разрядов, срок службы при постоянном напряжении значительно меньше. При постоянном напряжении, так же как и на переменном, ЧР представляют собой пробои участков изоляции с пониженной электрической прочностью, например газовых включений или пленок жидкого диэлектрика в слоистой изоляции. Существенное отличие в протекании процесса на постоянном напряжении заключается в том, что интенсивные ЧР типа критических имеют место только при включении напряжения или его изменении во времени. В результате разрядов на стенках газовых включений образуются поверхностные заряды. Дополнительное поле этих зарядов направлено навстречу основному, что вызывает ослабление результирующей напряженности во включении.

В момент погасания разряда результирующая напряженность поля равна напряженности погасания $E_{в.п}$

$$E_{рез} = E_{в.п} - E_{0пов} = E_{в.п}, \quad (4-36)$$

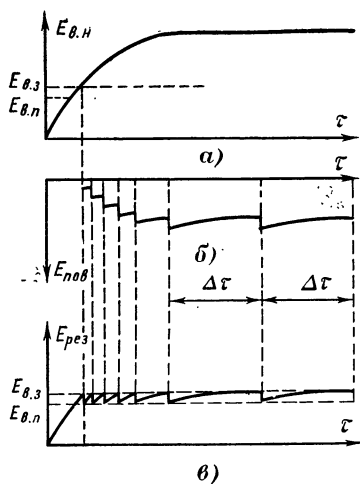


Рис. 4-17. Изменение результирующей напряженности во включении при воздействии постоянного напряжения.

a — напряженность поля, создаваемая приложенным напряжением; *б* — напряженность поля, создаваемая поверхностным зарядом; *в* — результирующая напряженность во включении.

возрастает и следующий ЧР произойдет, когда напряженность, создаваемая поверхностным зарядом, уменьшится на разность между напряженностями зажигания $E_{в.з}$ и погасания $E_{в.п}$ ЧР.

Если $(E_{в.з} - E_{в.п})/E_{в.з} = m_1$ и $E_{0пов}/E_{в.з} = m_2$, то интервал времени $\Delta\tau$ между ЧР в рассматриваемом включении на основании (4-36) и (4-38) равен:

$$\Delta\tau = \tau_{и} \ln \frac{m_2}{m_2 - m_1}. \quad (4-39)$$

Так как для постоянного напряжения обычно $m_1 \ll m_2$, то

$$\ln \frac{m_2}{m_2 - m_1} \approx \frac{m_1}{m_2} \quad (4-40)$$

и (4-40) принимает вид:

$$\Delta\tau = \tau_{и} \frac{m_1}{m_2} = \tau_{и} \frac{E_{в.з} - E_{в.п}}{E_{0пов}}. \quad (4-41)$$

Учитывая также, что при значительных приложенных напряжениях $E_{в.п} \ll E_{в.н}$, на основании (4-36) получаем:

$$E_{0пов} \approx E_{в.н} \quad (4-42)$$

и

$$\Delta\tau = \tau_{и} \frac{E_{в.з} - E_{в.п}}{E_{в.н}} = \tau_{и} \frac{U_з - U_п}{U}. \quad (4-43)$$

где $E_{в.н}$ — напряженность во включении, создаваемая приложенным напряжением в предположении отсутствия в нем разряда.

Схематически это показано на рис. 4-17. В дальнейшем после погасания разряда за счет проводимости бумаги и пропитывающего состава происходит стекание поверхностного заряда $q_{пов}$. При этом напряженность, созданная поверхностными зарядами, изменяется по закону

$$E_{пов} = E_{0пов} e^{-t/\tau_{и}}, \quad (4-37)$$

где $\tau_{и} = \rho_{в}\epsilon$ — постоянная времени стекания поверхностного заряда через проводимость диэлектрика.

Условием повторного ЧР для установившегося значения постоянного напряжения является равенство

$$E_{0пов} (1 - e^{-\Delta t/\tau_{и}}) = E_{в.з} - E_{в.п}. \quad (4-38)$$

В результате стекания заряда напряженность во включении

возрастает и следующий ЧР произойдет, когда напряженность, создаваемая поверхностным зарядом, уменьшится на разность между напряженностями зажигания $E_{в.з}$ и погасания $E_{в.п}$ ЧР.

Если $(E_{в.з} - E_{в.п})/E_{в.з} = m_1$ и $E_{0пов}/E_{в.з} = m_2$, то интервал времени $\Delta\tau$ между ЧР в рассматриваемом включении на основании (4-36) и (4-38) равен:

$$\Delta\tau = \tau_{и} \ln \frac{m_2}{m_2 - m_1}. \quad (4-39)$$

Так как для постоянного напряжения обычно $m_1 \ll m_2$, то

$$\ln \frac{m_2}{m_2 - m_1} \approx \frac{m_1}{m_2} \quad (4-40)$$

и (4-40) принимает вид:

$$\Delta\tau = \tau_{и} \frac{m_1}{m_2} = \tau_{и} \frac{E_{в.з} - E_{в.п}}{E_{0пов}}. \quad (4-41)$$

Учитывая также, что при значительных приложенных напряжениях $E_{в.п} \ll E_{в.н}$, на основании (4-36) получаем:

$$E_{0пов} \approx E_{в.н} \quad (4-42)$$

и

$$\Delta\tau = \tau_{и} \frac{E_{в.з} - E_{в.п}}{E_{в.н}} = \tau_{и} \frac{U_з - U_п}{U}. \quad (4-43)$$

Таким образом, при заданной постоянной времени изоляции $\tau_{\text{и}}$ интервал между ЧР определяется степенью превышения приложенного напряжения U над напряжением зажигания $U_{\text{з}}$ или погасания $U_{\text{п}}$ ЧР. Обычно $\tau_{\text{и}}$ при 20°C составляет сотни и тысячи секунд, в результате чего интервалы между ЧР во включении имеют длительность порядка единиц или десятков секунд. Это на несколько порядков меньше, чем при напряжении промышленной частоты. Характерные осциллограммы ЧР при постоянном напряжении приведены на рис. 4-18.

На постоянном напряжении, даже при наличии острого края электрода, ЧР развиваются по всей площади электрода. Это объясняется ослаблением краевого эффекта вследствие появления при постоянном напряжении значительной по сравнению с поперечной проводимостью продольной проводимости прослоек жидкого диэлектрика бумажно-пропитанной изоляции. При постоянном напряжении напряженности начальных ЧР значительно выше, чем при переменном, и существенно зависят от температуры изоляции (рис 4-19) и ее влажности [Л. 4-8].

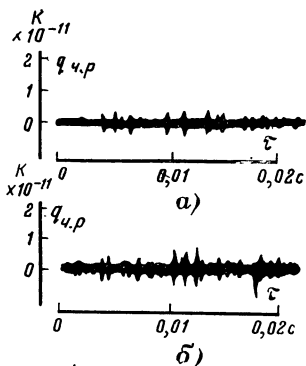


Рис. 4-18. Характерные осциллограммы ЧР при постоянном напряжении.

$a - t = 20^{\circ}\text{C}$; $b - t = 80^{\circ}\text{C}$.

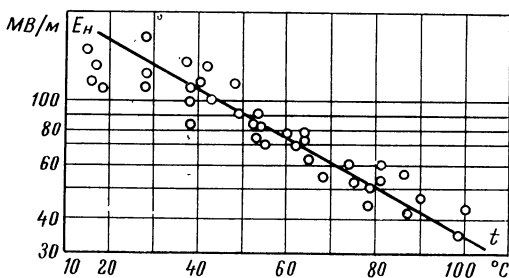


Рис. 4-19. Зависимость напряженности ЧР от температуры при постоянном напряжении; бумага КОН-II, пропитанная конденсаторным маслом, $d_c = 80$ мкм.

Изменение толщины диэлектрика конденсаторной изоляции в диапазоне 30—300 мкм практически не сказывается на напряженности ЧР, что объясняется отсутствием влияния краевого эффекта электродов. При постоянном напряжении, так же как и при переменном, зависимости тока и мощности ЧР от напряжения (напряженности) хорошо выражаются формулами:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{н0}} \left(\frac{E}{E_{\text{н}}} \right)^{a_{\text{н}}}; \quad (4-44)$$

$$P_H = P_{H0} \left(\frac{E}{E_H} \right)^{a_3} = A_4 E^{a_3}. \quad (4-45)$$

В этих зависимостях показатели степени a_2 и a_3 существенно больше, чем в аналогичных зависимостях для переменного напряжения: $a_2=9$ и $a_3=10$. Для отдельных образцов значение a_3 колеблется от 8 до 14.

Глава пятая

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИЛОВОГО КОНДЕНСАТОРА

5-1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

При расчете конденсатора задаются технические требования, которым он должен удовлетворять, и ряд исходных параметров. Для конденсаторов, работающих при синусоидальном переменном напряжении, задаются: номинальное напряжение $U_{ном}$, номинальная частота $f_{ном}$ и номинальная емкость $C_{ном}$. Вместо емкости может быть задана номинальная реактивная мощность. Если напряжение не синусоидально, то задаются его форма и гармонический состав. При пульсирующем рабочем напряжении (конденсаторы для линий электропередачи постоянного тока, для фильтров и пр.) должны быть заданы форма и гармонический состав переменной и постоянная составляющая напряжения. При расчете импульсных конденсаторов задается амплитуда импульса напряжения. Дополнительно могут быть заданы собственная индуктивность, амплитуда напряжения противоположной полярности (реверс) при колебательном разряде, амплитуда разрядного тока и пр. Вместо емкости может быть задана запасаемая энергия. При расчете конденсатора любого типа должен быть задан его ресурс, обычно выражаемый в годах. Для импульсных конденсаторов ресурс может быть задан количеством импульсов. Кроме того, задаются форма, значение и длительность приложения испытательных напряжений.

Помимо изложенного указываются условия работы конденсатора: условия охлаждения — диапазон изменения окружающей температуры, что определяет тип диэлектрика, применяемого в конденсаторе, интенсивность солнечной радиации (для конденсаторов наружной установки), входная температура охлаждающей воды для электротермических конденсаторов и т. п.; режим работы (длительный, повторно-кратковременный, для импульсных конденсаторов форма и частота повторения импульсов и т. п.); значение, форма и частота появления перенапряжений, пределы колебания рабочего напряжения; допустимые отклонения от номинального значения емкости, реактивной мощности или запасаемой энергии.

Задача расчета сводится к выбору рабочей напряженности поля E_p , определению толщины диэлектрика d_c и емкости секции C_c , определению числа последовательно соединенных групп и числа параллельно включенных в группе секций, размеров пакета, изоляции пакета от корпуса при металлическом корпусе и размеров корпуса. Затем производится выбор проходных изоляторов, через которые конденсатор подключается к внешней сети. Допустимая рабочая напряженность зависит от режима работы конденсатора, вида диэлектрика, толщины изоляции в секциях конденсатора (гл. 11).

Общий принцип, лежащий в основе проектирования силовых конденсаторов, состоит в том, что для заданных условий и режима работы конденсатор должен иметь максимальный ресурс при минимальных объеме, массе и стоимости. Отсюда вытекают требования к режиму, конструкции, технологии и т. п. В отдельных случаях при работе конденсатора в специальных условиях могут преобладать специальные требования, например, требование повышенной надежности и т. п., которые и будут определяющими при расчете.

5-2. УДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРА

Одним из показателей экономичности конденсаторов являются его удельные характеристики, представляющие собой отношение одного из выходных параметров конденсатора — энергии или реактивной мощности — к его полному объему V или массе G . Первая характеристика называется удельной по объему, вторая — удельной по массе. Можно рассматривать комбинированную удельную характеристику, представляющую собой произведение удельных характеристик по объему и массе или отношение квадрата параметра к произведению объема на массу. Однако эта характеристика не получила широкого распространения.

Для конденсаторов, используемых в качестве накопителей энергии, характеристикой является удельная энергия

$$W'_{\text{уд}} = W_{\text{к}}/V \quad (5-1)$$

или

$$W''_{\text{уд}} = W_{\text{к}}/G, \quad (5-2)$$

где $W_{\text{к}}$ — запасаемая в конденсаторе энергия.

В общем случае $W_{\text{к}} = C_{\text{к}} U_{\text{ном}}^2/2$, где $C_{\text{к}}$ — емкость конденсатора, и тогда

$$W'_{\text{уд}} = C'_{\text{уд}} U_{\text{ном}}^2/2; \quad (5-3)$$

$$W''_{\text{уд}} = C''_{\text{уд}} U_{\text{ном}}^2/2, \quad (5-4)$$

где $C'_{\text{уд}}$ и $C''_{\text{уд}}$ — удельные характеристики конденсатора по емкости.

Для конденсатора при учете только активного объема диэлектрика $V_{\text{а}}$ удельная энергия равна $W'_{\text{уд}} = \varepsilon E_{\text{pm}}^2/2$, где E_{pm} — амплитудное значение рабочей напряженности.

Пропитанная бумага имеет $\varepsilon \approx (5 \div 6) \varepsilon_0$ и электрическую прочность при постоянном напряжении $E_{\text{пр}} \approx 250$ МВ/м. При этом, как показывает опыт, для им-

пульсных конденсаторов можно выбирать предельные рабочие напряженности до 100 МВ/м. Подставляя это значение в формулу для $W'_{\text{уд}}$, находим порядок предельного значения удельной запасаемой энергии в импульсных конденсаторах с пропитанным бумажным диэлектриком $W'_{\text{уд}} = 250 \div 300$ Дж/л.

Практически при длительном режиме работы (порядка 10^4 импульсов) удельная энергия составляет $W'_{\text{уд}} \leq \leq 100$ Дж/л. Применение пленки позволяет увеличить удельную объемную энергию импульсных конденсаторов до $W'_{\text{уд}} = 350 \div 400$ Дж/л.

Удельной характеристикой конденсаторов для повышения коэффициента мощности является удельная реактивная мощность

$$Q'_{\text{уд}} = Q/V; \quad (5-5)$$

$$Q''_{\text{уд}} = Q/G. \quad (5-6)$$

При учете только активного объема диэлектрика удельная реактивная мощность конденсатора составляет:

$$Q'_{\text{уд}} = 2\pi f C_{\text{к}} U_{\text{ном}}^2 / V_{\text{а}} = 2\pi f C'_{\text{уд}} U_{\text{ном}}^2 = 2\pi f \epsilon E_{\text{р}}^2, \quad (5-7)$$

где $E_{\text{р}}$ — действующее значение рабочей напряженности.

Значение $Q'_{\text{уд}}$ зависит от частоты f воздействующего напряжения и для данного диэлектрика определяется произведением $f E_{\text{р}}^2$. Используя удельные характеристики, выходной параметр конденсатора (реактивную мощность) можно представить как $Q = Q'_{\text{уд}} V_{\text{а}}$, откуда видно, что он является линейной функцией активного объема. В отличие от электрических машин и трансформаторов, где увеличение мощности в одной конструктивной единице имеет следствием улучшение использования материалов и уменьшение их расхода на единицу мощности, в силовых конденсаторах подобная зависимость отсутствует [Л. 5-1]. Улучшение технико-экономических показателей конденсаторов связано только с увеличением $Q'_{\text{уд}}$. Поэтому необходимо выявить электрофизические и конструктивные параметры конденсатора, определяющие $Q'_{\text{уд}}$.

Для спирально намотанной плоскопрессованной секции конденсатора, независимо от вида диэлектрика (бумага, пленка, комбинация бумаги с пленкой), активный объем секции $V_{\text{с.а}}$ равен:

$$V_{\text{с.а}} = S_{\text{а}} d (1 + d_{\text{ф}}/d) = V_{\text{с.а.д}} (1 + k/\xi), \quad (5-8)$$

где $d = nd_1/k$; $\xi = nd_1/d_\Phi$; S_a — активная площадь обкладки; $V_{c.a.d}$ — объем активного диэлектрика; второй член в скобках представляет собой поправку на наличие фольги.

Заменяя в (5-8) $d = U_c/E_p$, $S_a = C_c d/\epsilon$ и ϵ выражением (2-21), в котором $\epsilon_k = \beta \epsilon_n$, получаем:

$$V_{c.a} = \frac{C_c U_c^2}{E_p^2} \frac{1 - k \left\{ 1 - \beta \frac{\epsilon_k}{\epsilon_n} + \kappa \left[\frac{\gamma_6}{\gamma_k} (1 - \beta) - \left(1 - \beta \frac{\epsilon_k}{\epsilon_n} \right) \right] \right\}}{\beta \epsilon_k}. \quad (5-9)$$

Реактивная мощность секции $Q_c = 2\pi f C_c U_c^2$, и теперь

$$Q'_{уд.c.a} = \frac{Q_c}{V_{c.a}} = \frac{2\pi f \epsilon_k E_p^2}{1 + \frac{k}{\xi}} \times \\ \times \frac{\beta}{1 - k \left\{ 1 - \beta \frac{\epsilon_k}{\epsilon_n} + \kappa \left[\frac{\gamma_6}{\gamma_k} (1 - \beta) - \left(1 - \beta \frac{\epsilon_k}{\epsilon_n} \right) \right] \right\}}. \quad (5-10)$$

Выражение (5-10) не имеет экстремума ни по одному параметру как конструктивному (ξ , κ), так и электрофизическому (γ , β). Предельное значение удельной реактивной мощности $Q'_{уд.пр}$ имеет место при $\beta \rightarrow \infty$ и $\xi \rightarrow \infty$ и может быть определено из (5-10).

Если в конденсаторе число секций равно n_c , то его активный объем

$$V_a = n_c V_{c.a} = n_c V_{c.a.d} \left(1 + \frac{k}{\xi} \right). \quad (5-11)$$

Полный объем конденсатора, кроме активного объема, включает в себя объемы закраин V_z , изоляции пакета от корпуса $V_{и}$, являющегося функцией номинального напряжения конденсатора; металла корпуса V_m и некоторого дополнительного свободного объема $V_{доп}$, используемого для монтажа, т. е.

$$V = V_a + V_z + V_{и} + V_m + V_{доп}. \quad (5-12)$$

Коэффициент использования объема k_v равен:

$$k_v = \frac{V_a}{V} = \frac{V_a}{V_a + V_z + V_{и} + V_m + V_{доп}} \quad (5-13)$$

или

$$k_V = \frac{1}{1 + 2l_3/b_a + k_{и}(d_{и}) + k_{м} + k_{доп}}, \quad (5-14)$$

где b_a — активная ширина фольги; $d_{и}$ — толщина изоляции пакета от корпуса; l_3 — ширина закраины; $k_{и}(d_{и}) = V_{и}/V_a$; $k_{м} = V_{м}/V_a$ и $k_{доп} = V_{доп}/V_a$.

Заменяя в (5-11) $V_a = k_V V$, получаем выражение для полного объема конденсатора

$$V = n_c V_{с.а.д} \left(1 + \frac{k}{\xi}\right) \frac{1}{k_V}. \quad (5-15)$$

Так как реактивная мощность конденсатора равна $Q_K = n_c Q_c$, то удельная реактивная мощность может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} Q'_{уд} &= Q_K/V = n_c Q_c k_V / n_c V_{с.а.д} (1 + k/\xi) = \\ &= Q'_{уд.с.а.д} k_V / (1 + k/\xi), \end{aligned} \quad (5-16)$$

где $Q'_{уд.с.а.д} = Q_c/V_{с.а.д}$ — есть удельная характеристика секции по активному объему диэлектрика.

Подставив значение k_V из (5-14) в (5-16), получим окончательное выражение для $Q'_{уд}$:

$$Q'_{уд} = \frac{Q'_{уд.с.а.д}}{(1 + k/\xi) [1 + 2l_3/b_a + k_{и}(d_{и}) + k_{м} + k_{доп}]}. \quad (5-17)$$

Значения величины $k_{м}$ и $k_{доп}$ у конденсаторов для повышения коэффициента мощности по ГОСТ 1282-72 равны: для первого габарита $k_{м} = 0,03$ и $k_{доп} = 0,088$; для второго габарита $k_{м} = 0,038$ и $k_{доп} = 0,041$. Преобразуя формулу (5-15) с использованием (5-14), находим значение полного объема конденсатора:

$$V = \frac{C_K I_{2НОМ}^{1/2}}{\epsilon E^2_p} \left(1 + \frac{k}{\xi}\right) \left[1 + \frac{2l_3}{b_a} + k_{и}(d_{и}) + k_{м} + k_{доп}\right]. \quad (5-18)$$

Из (5-18) следует, что объем конденсатора, а следовательно, расход материала и его стоимость обратно пропорциональны диэлектрической проницаемости и квадрату рабочей напряженности поля. Чем выше E_p , тем меньше расход материалов и тем экономичнее конденсатор. Однако значением E_p определяются также надежность и срок службы конденсатора. Здесь влияние

E_p обратное; с его увеличением снижается надежность и срок службы, растет нагрев, увеличивается опасность возникновения и развития ЧР. Из сказанного следует, что при конструировании конденсатора основной задачей является правильный выбор рабочей напряженности поля в диэлектрике (гл. 11).

5-3. РАСЧЕТ ЕМКОСТИ СЕКЦИИ И ПАКЕТА

Зная рабочую напряженность поля E_p , можно определить напряжение на секции

$$U_c = E_p d. \quad (5-19)$$

В зависимости от типа и назначения конденсатора секции в нем могут быть соединены последовательно, параллельно или смешанно, что определяется допустимым напряжением на секции. Для переменного напряжения частоты 50 Гц допустимое значение U_c имеет порядок 1 кВ. Изготовление секции с $U_c > 1$ кВ связано с повышением толщины диэлектрика, что ухудшает характеристики ЧР. В импульсных конденсаторах U_c может достигать 10 кВ. Параллельное соединение секций применяется там, где номинальное напряжение конденсатора не превосходит допустимое напряжение на секции U_c . В противном случае применяется последовательное или смешанное соединение. Подсчитав U_c , можно найти число последовательно соединенных групп m :

$$m = U_{\text{ном}} / U_c. \quad (5-20)$$

Затем производится расчет емкости секции C_c . Для спирально намотанной плоскопрессованной секции она равна удвоенному значению емкости такой секции, развернутой в плоскую ленту, так как в ней имеются два отдельных диэлектрика, работающих на одни обкладки (рис. 1-5,а). Расчет емкости секции производится по формуле из [Л. 1-1—1-3, 1-9]

$$C_c = 2\epsilon S_a / d, \quad (5-21)$$

где ϵ рассчитывается по (2-1) и (2-21); $S_a = l_{\text{ф}} b_a$ — площадь активной части; d — толщина; $l_{\text{ф}}$ — длина фольги.

Значение $l_{\text{ф}}$ определяется из формулы

$$l_{\text{ф}} = \pi D_{\text{ср}} \omega, \quad (5-22)$$

где $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр спирально намотанной секции; ω — число витков.

Подставив в (5-21) вместо S_a и l_ϕ их значения, получим:

$$C_c = 2\varepsilon D_{cp} \omega b_a / d. \quad (5-23)$$

Средний диаметр секции связан с параметрами секции и диаметром намоточной оправки D_n соотношением

$$D_{cp} = D_n + 2\omega (d + d_\phi). \quad (5-24)$$

После подстановки (5-24) в (5-23) получим окончательное выражение для емкости секции:

$$C_c = \frac{2\varepsilon b_a \omega}{d} [D_n + 2\omega (d + d_\phi)]. \quad (5-25)$$

Полученная формула связывает конструктивные параметры секции с ее емкостью и может быть использована для расчета одного из них при известных других. Она применима для расчета секции со всеми диэлектриками, используемыми в силовом конденсаторостроении.

По емкости секции C_c и номинальной емкости $C_{ном}$ конденсатора находится число секций в пакете. При параллельном соединении n_c одинаковых секций общая емкость C пакета составляет $C = n_c C_c$, а при их последовательном соединении $C = C_c / n_c$. При смешанном соединении, когда пакет составляется из m последовательно соединенных групп с n_c параллельно соединенными секциями в каждой группе (общее число секций в пакете равно mn_c), емкость пакета рассчитывается по формуле $C = n_c C_c / m$. Обычно расчет производится для нескольких значений C_c и затем выбирается оптимальный вариант. При параллельном соединении пакетов емкость конденсатора равна суммарной емкости пакетов.

5-4. РАСЧЕТ ИЗОЛЯЦИИ ПАКЕТА ОТ КОРПУСА

В качестве изоляции пакета от корпуса в силовом конденсаторостроении применяется кабельная бумага или электрокартон. Толщина изоляции определяется уровнем изоляции конденсатора и зависит от его номинального напряжения и конструктивного исполнения. Применительно к конденсаторам для повышения коэффициента мощности, используемым в сетях переменного тока частотой 50 Гц и выпускаемым в металлических корпусах с изолированными выводами, испытательные

напряжения нормируются ГОСТ 1282-72 [Л. 5-2]. В табл. 5-1 приведены номинальные напряжения конденсаторов и соответствующие им испытательные напряжения (относительно корпуса).

Толщина изоляции $\Delta_{\text{и}}$

$$\Delta_{\text{и}} = k_{\text{и}} U_{\text{исп}} / E_{\text{пр}} + \Delta_0, \quad (5-26)$$

в которой $2 \leq k_{\text{и}} \leq 3$ — коэффициент запаса, учитывающий разброс электрической прочности; $U_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение, приведенное в табл. 5-1 или задаваемое техническими условиями; $E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность на частоте 50 Гц материала, применяемого в качестве изоляции. Для пропитанной кабельной бумаги зависимость $E_{\text{пр}}$ от числа листов приведена на рис. 5-1; для электрокартона от толщины — на рис. 5-2. Δ_0 — дополнительная толщина изоляции, составляющая для листового материала один-два листа. Практически при конструкторских расчетах изоляции из кабельной бумаги удобнее пользоваться зависимостью пробивного напряжения от числа листов, приведенной на рис. 5-3. Сначала по этой кривой находится число листов n , соответствующее пробоем при данном испы-

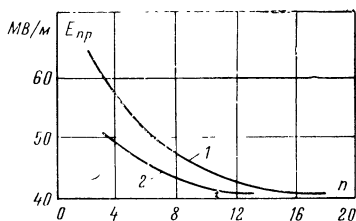


Рис. 5-1. Зависимость кратковременной электрической прочности пропитанной трихлордифенилом кабельной бумаги от числа листов на частоте 50 Гц.

1 — кабельная бумага KB-120; 2 — кабельная бумага Терсеп.

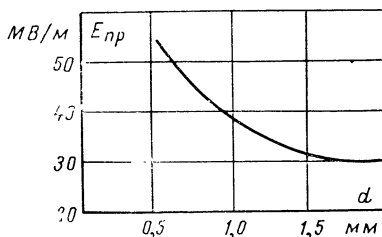


Рис. 5-2. Зависимость кратковременной электрической прочности пропитанного трихлордифенилом электрокартона от толщины d на частоте 50 Гц.

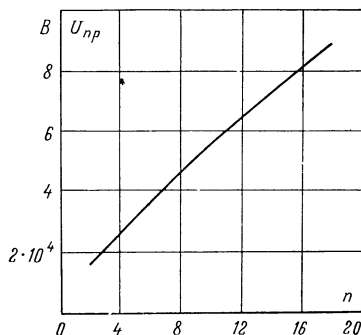


Рис. 5-3. Зависимость пробивного напряжения пропитанной трихлордифенилом кабельной бумаги KB-120 на частоте 50 Гц от числа листов.

Таблица 5-1

Номинальные и испытательные напряжения конденсаторов

Номинальное напряжение конденсатора, В	Испытательное напряжение переменного тока 50 Гц, В	Рекомендуемое число листов кабельной бумаги марки КВ-120
220, 380, 500	3000	3
600, 1050	6000	5
3050	16 000	9
6300	22 000	11
10 500	28 000	15

тательном напряжении. Затем полученное значение увеличивается в 2—3 раза и к нему добавляется один-два листа для механической защиты изоляции при сборке конденсатора.

Глава шестая**ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРАХ****6-1. ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЕ В КОНДЕНСАТОРЕ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ**

Тепловыделение, обусловленное наличием в силовом конденсаторе потерь, является фактором, в значительной мере определяющим его технические и экономические характеристики. Потери P_K в конденсаторе в основном состоят из потерь в рабочем диэлектрике P_d , в токоведущих частях P_m и дополнительных потерь $P_{и}$ в изоляции пакета от корпуса

$$P_K = P_d + P_m + P_{и}. \quad (6-1)$$

Потери в активном диэлектрике при синусоидальном напряжении рассчитываются по формуле

$$P_d = 2\pi f C_K U^2 \operatorname{tg} \delta_d = Q_K \operatorname{tg} \delta_d, \quad (6-2)$$

где C_K — емкость конденсатора; Q_K — реактивная мощность; $\operatorname{tg} \delta_d$ — тангенс угла потерь диэлектрика на данной частоте.

Поделив потери в диэлектрике на его объем, можно определить удельные потери $P_{уд}$, т. е. мощность, выделяемую в 1 м³ активного объема. Выражение для удельных потерь будет иметь различный вид в зависимости от того, как определен активный объем. Если взять

активный объем только рабочего диэлектрика (без учета объема закраин), то формула удельных потерь имеет вид:

$$P_{\text{уд}} = 2\pi \epsilon f E_p^2 \operatorname{tg} \delta_d; \quad (6-3)$$

здесь и далее E_p выражено в В/м; $P_{\text{уд}}$ — в Вт/м³.

Если в активный объем диэлектрика включен также объем, занимаемый фольгой, то формула удельных потерь примет следующий вид:

$$P'_{\text{уд}} = 2\pi \epsilon f E_p^2 \operatorname{tg} \delta_d d / (d + d_{\text{ф}}). \quad (6-4)$$

Поделив числитель и знаменатель на толщину фольги $d_{\text{ф}}$ и обозначив $d/d_{\text{ф}} = nd_1/kd_{\text{ф}} = \xi/k$, где $\xi = nd_1/d_{\text{ф}}$, получим:

$$P'_{\text{уд}} = 2\pi \epsilon f E_p^2 \operatorname{tg} \delta_d \frac{\xi/k}{\xi/k + 1}. \quad (6-5)$$

Потери в конденсаторе являются функцией многих параметров, одни из которых — ϵ , C_k , $\operatorname{tg} \delta_d$ зависят от электрофизических характеристик материалов, конструктивных факторов и технологии изготовления; другие — f , E , U — от условий эксплуатации. Влияние электрофизических характеристик компонентов, технологических факторов и запрессовки на факторы, определяющие потери в конденсаторе (ϵ и $\operatorname{tg} \delta_d$), рассмотрено выше. Дополнительно отметим, что снижения потерь в бумажном диэлектрике целесообразнее добиваться уменьшением плотности бумаги γ_6 , а не коэффициента запрессовки k , так как при одинаковом уменьшении потерь снижение γ_6 приводит к меньшему ухудшению удельных характеристик, чем уменьшение k . В процессе эксплуатации в конденсаторах имеет место необратимое увеличение $\operatorname{tg} \delta_d$ из-за старения диэлектрика.

Потери в металлических частях складываются из потерь в обкладках и потерь в соединительных шинах и выводах (§ 6-2). Доли потерь в диэлектрике и металлических частях различны для различных типов конденсаторов. У низковольтных конденсаторов для повышения коэффициента мощности потери в диэлектрике составляют 85—88% от общих $P_{\text{осн}}$, т. е. $P_d \approx (0,85 \div 0,88) P_{\text{осн}}$, а в металлических частях $P_m \approx (0,15 \div 0,12) P_{\text{осн}}$; в высоковольтных соответственно $P_d \approx (0,95 \div 0,97) P_{\text{осн}}$ и $P_m \approx (0,05 \div 0,03) P_{\text{осн}}$. В конденсаторах, предназначенных для работы при частоте 500 Гц, распределение потерь примерно такое же, как и в низковольтных. В конденса-

торах на более высокие частоты потери в металлических частях могут составлять 40—80% от общих. В импульсных конденсаторах, используемых в установках для создания больших импульсных токов, протекающие в цепи разряда токи весьма велики и потери в токоведущих частях (обкладки, шины, выводы) соизмеримы, а в ряде случаев превосходят потери в диэлектрике.

Дополнительные потери $P_{\text{и}}$ рассчитываются аналогично потерям в активном диэлектрике

$$P_{\text{и}} = 2\pi f C_{\text{и}} U^2 \operatorname{tg} \delta_{\text{и}}, \quad (6-6)$$

где $C_{\text{и}}$ — емкость изоляции (емкость на корпус); $\operatorname{tg} \delta_{\text{и}}$ — тангенс угла потерь изоляции от корпуса на данной частоте.

При включении на постоянное напряжение потери в конденсаторе определяются током проводимости и равны:

$$P = U^2 / r_{\text{и}}, \quad (6-7)$$

где $r_{\text{и}}$ — сопротивление изоляции диэлектрика.

Если конденсатор включен на напряжение, содержащее постоянную и переменную составляющие, то потери в нем равны сумме потерь от постоянной и переменной составляющих.

6-2. ПОТЕРИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТЯХ

В секциях со скрытой фольгой потери в обкладках зависят от места расположения и числа токоподводов [Л. 1-1, 1-3]. Пусть токоподводы расположены на конце обкладки (рис. 6-1, а), имеющей длину $l_{\text{ф}}$, ширину $b_{\text{ф}} = b_{\text{а}}$, толщину $d_{\text{ф}}$ и удельное сопротивление материала $\rho_{\text{ф}}$. В месте расположения токоподвода ток равен току секции I . В начале обкладки ток равен нулю и вдоль обкладки изменяется по линейному закону $I_x = Ix/l_{\text{ф}}$. Выделим на расстоянии x от начала обкладки элемент обкладки длиной dx . Его сопротивление равно: $dr(x) = \rho_{\text{ф}} dx / b_{\text{ф}} d_{\text{ф}}$ и потери мощности в нем составят:

$$dP'_{\text{м}} = I^2_x dr(x) = \rho_{\text{ф}} I^2 x^2 dx / l^2_{\text{ф}} b_{\text{ф}} d_{\text{ф}}.$$

Интегрируя полученное уравнение по длине обкладки и удваивая результат (так как обкладок две), получаем общие потери мощности в обкладках:

$$P'_{\text{м}} = 2 \int_0^{l_{\text{ф}}} \rho_{\text{ф}} \frac{I^2}{l^2_{\text{ф}} b_{\text{ф}} d_{\text{ф}}} x^2 dx = \frac{2}{3} \frac{\rho_{\text{ф}} l_{\text{ф}}}{b_{\text{ф}} d_{\text{ф}}} I^2. \quad (6-8)$$

Для расположения токоподводов, показанного на рис. 6-1,б, аналогично получим:

$$P'_m = \frac{l_\Phi}{6b_\Phi d_\Phi} \rho_\Phi I^2, \quad (6-9)$$

а для схемы на рис. 6-1, в

$$P'_m = \frac{1}{n^2} \frac{l_\Phi}{b_\Phi d_\Phi} \rho_\Phi I^2. \quad (6-10)$$

Согласно (6-10) увеличение числа токоподводов в n раз уменьшает потери в обкладках в n^2 раз. Однако в импульсных конденсаторах в секциях с широкой фольгой ($b_\Phi > 200$ мм) это мероприятие не дает указанного уменьшения потерь, так как в данном случае имеет место вытеснение тока на первую пару токоподводов, расположенную в начале фольги, в результате чего большая часть тока протекает через одну пару токоподводов [Л. 1-8]. Для уменьшения в импульсных конденсаторах эквивалентного активного сопротивления фольги [Л. 6-1] необходимо обеспечить равномерное распределение тока между токоподводами. Этого можно достигнуть следующими способами:

а) делением секции на несколько подсекций меньшей емкости, намотыванием отдельно и соединяемых затем параллельно;

б) делением фольги секции при ее намотке на несколько одинаковых частей с индивидуальными токоподводами для каждой части;

в) увеличении

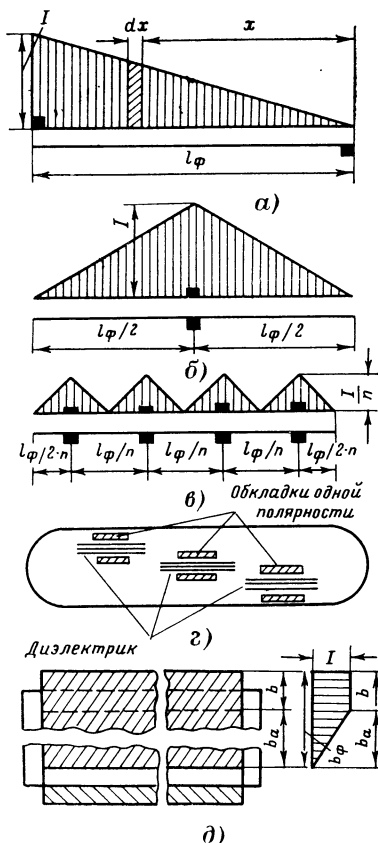


Рис. 6-1. Распределение тока при различном расположении токоподводов в секции со скрытой фольгой и в секции с выступающей фольгой.

ем числа пар токоподводов, равномерно распределенных по длине фольги и смещенных по торцу наматываемой секции, как это показано на рис. 6-1,з. Активное сопротивление можно уменьшить в равной степени всеми тремя способами. Однако при втором способе в случае нерационального расположения токоподводов может значительно возрасти индуктивность секции.

В секции с выступающей фольгой (рис. 6-1,д) ток отводится через торцевые части, при этом ширина фольги b_{ϕ} определяет длину пути тока, а ее длина l_{ϕ} — ширину сечения токоподвода. В этой конструкции активная ширина b_a диэлектрика не совпадает с шириной фольги, как это имело место в секциях со скрытой фольгой, а отличается от b_{ϕ} на ширину, равную сумме ширины закраины и ширины выступающей части фольги. В активной части ток изменяется по линейному закону, как и в случае рис. 6-1,а, а на участке фольги шириной b остается неизменным, как это схематически показано на рис. 6-1,з. Потери мощности P_m в активной части рассчитываются по (6-8), а на участке b — по формуле для проводника с неизменным по всей длине током. Подставляя в (6-8) значения, соответствующие конструкции с выступающей фольгой, получаем:

$$P'_m = \frac{2}{3} \frac{3b + b_a}{l_{\phi} d_{\phi}} \rho_{\phi} I^2. \quad (6-11)$$

С повышением частоты питающего напряжения активное сопротивление токоведущих частей повышается за счет поверхностного эффекта. Расчет потерь мощности в соединительных шинах и выводах с учетом поверхностного эффекта производится по формуле:

$$P''_m = I^2 r k_{\pi}, \quad (6-12)$$

где r — сопротивление проводника постоянному току; $k_{\pi} > 1$ — коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта.

Значение k_{π} для проводов различного сечения может быть рассчитано по формулам из [Л. 6-2]. При расчете потерь в обкладках в силу их малой толщины влиянием поверхностного эффекта можно пренебречь.

6.3. ПОТЕРИ В КОНДЕНСАТОРЕ ПРИ СЛОЖНОЙ ФОРМЕ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрим работу силового конденсатора с номинальной емкостью $C_{\text{НОМ}}$, включенного на несинусоидальное напряжение $u(\tau)$, заданное в виде

$$u(\tau) = U_{m1} \sin(\omega\tau + \varphi_1) + U_{m2} \sin(2\omega\tau + \varphi_2) + \dots \\ \dots + U_{mi} \sin(i\omega\tau + \varphi_i) + \dots \quad (6-13)$$

Пусть частота первой гармоники совпадает с номинальной. Выразив напряжение гармоник в долях номинального синусоидального напряжения $U_{\text{НОМ}}$ в виде $U_i/U_{\text{НОМ}} = m_i$, получим выражение для действующего значения напряжения [Л. 6-3—6-6]:

$$U = U_{\text{НОМ}} \sqrt{m^2_1 + m^2_2 + \dots + m^2_i + \dots} = U_{\text{НОМ}} S_u, \quad (6-14)$$

где $S_u = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} m^2_i}$.

Ток от i -й гармоники может быть записан в виде

$$I_i = 2\pi f_{\text{НОМ}} C_{\text{НОМ}} U_i = 2\pi f_{\text{НОМ}} C_{\text{НОМ}} U_{\text{НОМ}} i m_i, \quad (6-15)$$

а действующее значение несинусоидального тока

$$I = 2\pi f_{\text{НОМ}} C_{\text{НОМ}} U_{\text{НОМ}} \sqrt{m^2_1 + 4m^2_2 + \dots + i^2 m^2_i + \dots} = I_{\text{НОМ}} S_I, \quad (6-16)$$

где $S_I = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (im_i)^2}$; $I_{\text{НОМ}} = 2\pi f_{\text{НОМ}} C_{\text{НОМ}} U_{\text{НОМ}}$.

Потери мощности в диэлектрике от i -й гармоники $P_{\text{ди}}$ равны:

$$P_{\text{ди}} = 2\pi f_{\text{НОМ}} C_{\text{НОМ}} U^2_i \operatorname{tg} \delta_i = 2\pi f_{\text{НОМ}} C_{\text{НОМ}} U^2_{\text{НОМ}} \operatorname{tg} \delta_i i m_i, \quad (6-17)$$

а общие потери мощности в диэлектрике равны сумме потерь от гармоник

$$P_{\text{д}} = 2\pi f_{\text{НОМ}} C_{\text{НОМ}} U^2_{\text{НОМ}} (m^2_1 \operatorname{tg} \delta_1 + \\ + 2m^2_2 \operatorname{tg} \delta_2 + \dots + i m^2_i \operatorname{tg} \delta_i + \dots). \quad (6-18)$$

В диапазоне частот до 1000 Гц можно принять:

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \operatorname{tg} \delta_2 = \dots = \operatorname{tg} \delta_i = \dots = \operatorname{tg} \delta_{\text{д}}.$$

На основании этого потери в диэлектрике составят для конденсаторов, работающих в промышленных сетях:

$$P_d = 2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2 \operatorname{tg} \delta_d (m^2_1 + 2m^2_2 + \dots + im^2_i + \dots) P_{\text{ном}} S_p, \quad (6-19)$$

где $S_p = \sum_{i=1}^{\infty} im^2_i$; $P_{\text{ном}} = 2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2 \operatorname{tg} \delta_d$.

Для конденсаторов, работающих на несинусоидальном напряжении повышенной частоты, при расчете потерь в диэлектрике следует учитывать частотную зависимость $\operatorname{tg} \delta$.

Приведенные соотношения получены для конденсатора с номинальной емкостью. Если емкость конденсатора отлична от номинальной и частоты гармоник находятся в пределах, где емкость не зависит от частоты, то потери в конденсаторе можно определить, подставляя в приведенные выше формулы действительное значение емкости $C = k_C C_{\text{ном}}$ (k_C — коэффициент, учитывающий разброс емкости за счет допусков). Наибольший интерес представляют потери при максимальном значении емкости. Из соотношений (6-14), (6-16), (6-19) следует, что при $S_u = 1$, когда действующее значение несинусоидального напряжения равно номинальному, $S_I > 1$ и $S_p > 1$, это значит, что ток в конденсаторе и потери мощности в диэлектрике больше, чем при номинальном синусоидальном напряжении, причем $S_I > S_p$, т. е. ток изменяется сильнее, чем потери. Если спектральный состав напряжения меняется, но его действующее значение остается неизменным, т. е. $S_u = 1 = \text{const}$, ток через конденсатор и потери в диэлектрике не останутся неизменными.

Формулу (6-19) можно привести к виду

$$P_d = \frac{I^2 \operatorname{tg} \delta_d}{2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{ном}}} \frac{S_p}{S_I^2}. \quad (6-20)$$

Из этой формулы следует, что если даже при изменении формы синусоидального напряжения ток в конденсаторе останется неизменным ($S_I = \text{const}$), то потери в диэлектрике изменятся вследствие изменения S_p .

В тех случаях, когда напряжение несинусоидальной формы характеризуется большой скоростью нарастания,

при определении потерь в диэлектрике конденсатора при больших значениях $\operatorname{tg} \delta$ могут возникать ошибки, связанные с тем, что расчетные формулы (6-19), (6-20) не учитывают зависимость эквивалентной емкости конденсатора от $\operatorname{tg} \delta$. В этом случае значение емкости на i -й гармонике, определенное по простой параллельной схеме C_{pi} , может существенно отличаться от значения емкости C_{si} , определенного по простой последовательной схеме, как это следует из формулы (6-21), связывающей емкости C_{pi} и C_{si} с $\operatorname{tg} \delta_i$ (тангенсом угла потерь на i -й гармонике) [Л. 6-7, 6-8]:

$$C_{pi} = C_{si} / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta_i). \quad (6-21)$$

В ряде случаев целесообразно использовать более сложные эквивалентные схемы [Л. 6-7, 6-8], так как они более точно отражают соотношения между емкостью и параметрами диэлектрика.

Для расчета потерь в диэлектрике импульсного конденсатора применим метод разложения в ряд Фурье. Если пренебречь потерями от постоянной составляющей в силу их малости, потери в диэлектрике от переменной составляющей можно подсчитать по формуле

$$P_d = 2\pi f_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2 \sum_{i=1}^{\infty} (im^2_i C_{pi} \operatorname{tg} \delta_i), \quad (6-22)$$

где C_{pi} — емкость конденсатора на i -й гармонике.

Конденсатор может работать в режиме последовательного чередования зарядов и разрядов, длительность которых примерно одинакова (рис. 6-2,а), при этом ряд Фурье быстро сходится.

Возможен режим, когда конденсатор заряжается от маломощного источника в течение длительного промежутка времени, а отдает запасенную энергию в течение малого промежутка времени. При этом последовательность импульсов состоит из длительных зарядов и кратковременных разрядов конденсатора (рис. 6-2,б) и ряд Фурье, описывающий этот процесс, имеет плохую сходимость. В этом случае более простое решение может быть получено заменой указанной последовательности двумя самостоятельными последовательностями, описывающими процессы, характеризующиеся одинаковой длитель-

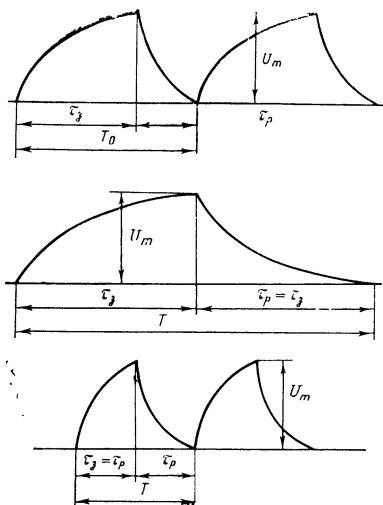


Рис. 6-2. К расчету потерь в конденсаторе при аperiodическом разряде.

Верх (а) — воздействующее на конденсатор напряжение (длительный заряд и кратковременный разряд); середина (б) — последовательность длительных заряд-разрядов; низ (в) — последовательность кратковременных заряд-разрядов.

ностью заряда и разряда, как это показано на рис. 6-2. При этом предполагается, что потери в диэлектрике от воздействия одиночного заряда равноценны потерям от действия единичного разряда такой же амплитуды, формы и длительности (рис.

6-2,в). Потери в диэлектрике для каждой последовательности подсчитываются отдельно по формуле

$$P_d = 2\pi f_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2 \frac{\tau_p}{T_0} \sum_{i=1}^{\infty} i m^2 C_{pi} \operatorname{tg} \delta_i, \quad (6-23)$$

где τ_p — длительность разряда (заряда); T_0 — интервал времени между импульсами (рис. 6-2,а).

Для определения потерь в диэлектрике конденсатора, работающего в режиме аperiodических импульсов, можно отдельные участки кривой импульса напряжения заменить отрезками синусоиды [Л. 6-6], период которой в 4 раза превышает длительность нарастания или спада, а амплитуда равна максимальному значению импульса. Плоский участок на вершине импульса заменяется постоянным напряжением, равным максимальному значению импульса. В этом случае потери могут быть описаны формулой

$$\begin{aligned} P_d &= \frac{U_m^2}{2} C_k z_1 (\omega_f \tau_f \operatorname{tg} \delta_f + \omega_c \tau_c \operatorname{tg} \delta_c) = \\ &= \frac{\pi U_m^2}{4} C_k z_1 (\operatorname{tg} \delta_f + \operatorname{tg} \delta_c), \end{aligned} \quad (6-24)$$

где $\omega_f = 2\pi/4\tau_f$ — угловая частота, соответствующая фронту импульса с длительностью τ_f ; $\omega_c = 2\pi/4\tau_c$ — угловая частота, соответствующая спаду импульса с дли-

тельностью τ_c ; $\operatorname{tg} \delta_\phi$ и $\operatorname{tg} \delta_c$ — тангенсы углов диэлектрических потерь, соответствующие частотам $f_\phi = \omega_\phi / 2\pi$ и $f_c = \omega_c / 2\pi$; z_1 — число разрядов конденсатора в 1 с; U_m — амплитуда синусоиды; C_K — емкость конденсатора.

Для $\tau_\phi = \tau_c$ имеем:

$$P_d = U_m^2 C_K z_1 \omega_\phi \tau_\phi \operatorname{tg} \delta_\phi = \\ = \frac{\pi U_m^2}{2} C_K z_1 \operatorname{tg} \delta_\phi. \quad (6-25)$$

Формулу (6-25) при отсутствии плоского участка на вершине импульса можно также представить в виде

$$P_d = \frac{U_m^2}{2} \omega_\phi C_K \operatorname{tg} \delta_\phi \frac{1}{G}, \quad (6-26)$$

где G — скважность импульсов.

Ниже приводятся формулы для расчета потерь в диэлектрике при различных формах воздействующих напряжений, показанных на рис. 6-3 [Л. 6-9].

а) Для пилообразных импульсов (рис. 6-3,а) при $\tau_c \ll T_0$:

$$P_d = U_m^2 C_K \operatorname{tg} \delta 0,038 T_0^2 / \tau_c^2. \quad (6-27)$$

б) Для трапецидальных импульсов (рис. 6-3,б)

$$P_d = U_m^2 C_K \operatorname{tg} \delta 0,62 T_0^2 / (\tau_\phi + \tau_c)^2. \quad (6-28)$$

в) Для треугольных импульсов (рис. 6-3,в)

$$P_d = U_m^2 C_K \operatorname{tg} \delta 0,62 T_0^2 / \tau_\phi^2. \quad (6-29)$$

г) Для импульсов с высокочастотным заполнением (рис. 6-3,г)

$$P_d = \frac{U_m^2 \omega_0 C_K \operatorname{tg} \delta}{2} \left[\frac{(2\tau_\phi - \tau_\phi - \tau_c)^2}{4T_0^2} + \frac{0,18 T_0^2}{(\tau_\phi + \tau_c)^2} \right]. \quad (6-30)$$

Формулы получены в предположении, что $\operatorname{tg} \delta$ не зависит от частоты в диапазоне учитываемых в расчете

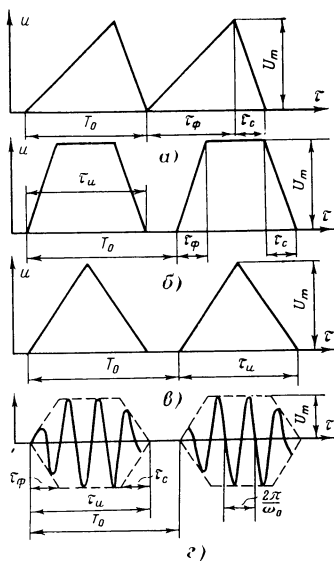


Рис. 6-3. К расчету потерь при различных формах импульсного напряжения.

гармоник. Значение $\lg \delta$ в этих формулах следует брать для частот, соответствующих частоте следования импульсов $f=1/T_0$. Они дают предельное значение потерь мощности при данной форме импульса. Действительные значения потерь будут несколько ниже.

Определим потери в токоведущих частях.

Для расчета потерь P'_m в обкладках, имеющих сопротивление r_ϕ , можно воспользоваться формулой

$$P'_m = I^2 r_\phi = (2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{ном}} U_{\text{ном}})^2 S^2_I r_\phi = P'_{m.\text{ном}} S^2_I, \quad (6-31)$$

где $P'_{m.\text{ном}} = (2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{ном}} U_{\text{ном}})^2 r_\phi$ — потери в обкладках при номинальном синусоидальном режиме.

Потери в обкладках при несинусоидальном напряжении больше, чем в номинальном режиме в S^2_I раз.

Токоведущие части состоят из отдельных участков, имеющих различную форму (плоские соединительные шины, цилиндрические стержневые выводы и т. п.) и различные коэффициенты поверхностного эффекта. Поэтому потери в токоведущих частях определяются по участкам, после чего суммируются и определяются общие потери. Согласно (6-12) потери от i -й гармоники на l -м участке составляют:

$$P''_{mli} = I^2_{i r li} = (2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{ном}} U_{\text{ном}})^2 r_l k_{\Pi l} i^2 m^2_i, \quad (6-32)$$

а для всех гармоник

$$P''_{m l} = \sum_{i=1}^{\infty} P''_{m li} = (2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{ном}} U_{\text{ном}})^2 \sum_{i=1}^{\infty} r_l k_{\Pi l} i^2 m^2_i. \quad (6-33)$$

Вынося за знак суммы r_l и значение $k_{\Pi l}$ для первой гармоники, получим:

$$P''_{m l} = (2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{ном}} U_{\text{ном}})^2 r_l k_{\Pi l} \left(m^2_1 + 4 \frac{k_{\Pi l_2}}{k_{\Pi l_1}} m^2_2 + \dots + \right. \\ \left. + i^2 \frac{k_{\Pi l_2}}{k_{\Pi l_1}} m^2_i + \dots \right) = P_{m.\text{ном}} S_{P_\Gamma}, \quad (6-34)$$

где $P_{m.\text{ном} l}$ — потери на участке l в номинальном режиме;

$$S_{P_\Gamma} = m^2_1 + 4 \frac{k_{\Pi l_2}}{k_{\Pi l_1}} m^2_2 + \dots + i^2 \frac{k_{\Pi l_2}}{k_{\Pi l_1}} m^2_i + \dots$$

Нетрудно видеть, что $S_{P_\Gamma} > S_P$. Если спектральный состав напряжения изменяется так, что $S_I = \text{const}$, S

не остается неизменной. Аналогичные соотношения могут быть получены и для других участков.

Потери в изоляции от корпуса $P_{\text{и}}$ при несинусоидальном напряжении определяются аналогично потерям в диэлектрике и равны:

$$P_{\text{и}} = 2\pi f_{\text{ном}} C_{\text{и}} U_{\text{ном}}^2 \operatorname{tg} \delta_{\text{и}} S_{\text{р}}. \quad (6-35)$$

Определение потерь в изоляции от корпуса при импульсном напряжении производится аналогично определению потерь в диэлектрике в таком же режиме.

6-4. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Тепловая устойчивость конденсатора и связанная с ней реактивная мощность в конструктивной единице зависят не только от количества выделяемого в нем тепла, но также и от характеристик путей теплоотвода, определяемых теплофизическими свойствами материалов и конструкцией конденсатора. Теплопередача внутри конденсатора происходит за счет теплопроводности. В некоторых конструкциях встречается дополнительный теплоотвод естественной конвекцией. В конденсаторах с естественным охлаждением передача тепла охлаждающей среде происходит за счет рассеяния тепла с поверхности корпуса, а в конденсаторах с принудительным жидкостным охлаждением — за счет теплообмена с протекающей по охлаждающей системе водой. Способность вещества проводить тепло характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , значение которого зависит от структуры, плотности, влажности и температуры материала, а для газов и жидкостей — также и от давления. В силовых конденсаторах влияние давления и влажности на λ исключается, поскольку в рабочем состоянии материалы хорошо высушены и находятся в герметично закрытом объеме, давление в котором остается почти неизменным.

При работе различные участки конденсатора принимают различную температуру, что приводит к некоторому изменению λ , различному для разных материалов. Однако в практических расчетах значение λ обычно принимается постоянным и равным среднему арифметическому из значений λ , соответствующих предельным температурам тела. В расчетной практике обычно пользу-

ются экспериментальными значениями коэффициентов теплопроводности конденсаторных материалов, в том числе и пропитанной бумаги, определяемых в рабочем диапазоне изменения температуры конденсатора. Они несколько разнятся у отдельных авторов. Для некоторых материалов их численные значения приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1

Коэффициенты теплопроводности конденсаторных материалов

Материал	Теплосемкость, Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Бумага непропитанная	—	0,139
Бумага, пропитанная нефтяным маслом	$1,51 \cdot 10^3$	0,170
Бумага, пропитанная хлордифенилами	—	0,160
Гетинакс	$1,51 \cdot 10^3$	0,170
Фарфор электротехнический высоковольтный	$0,88 \cdot 10^3$	0,130
Винипласт	—	0,160
Пленка полиэтиленовая	—	0,200
Пленка полистирольная	—	0,160
„ лавсановая	—	0,220
„ из фторопласта-4	—	0,230
Масло нефтяное	—	0,150
Масло касторовое	—	0,180
Трихлордифенил	—	0,180
Пентахлордифенил	—	0,101
Фольга алюминиевая	$0,84 \cdot 10^3$	200
Медь	$0,38 \cdot 10^3$	393
Сталь	$0,46 \cdot 10^3$	58,6

Для предельных структур (последовательное или параллельное соединение компонентов) дисперсных систем, к каким относятся и изоляционные бумаги, в [Л. 6-10] даны формулы для расчета коэффициентов теплопроводности, соответственно имеющие вид:

для последовательного соединения компонентов

$$\lambda = \frac{100 \lambda_2}{\lambda_2 (100 - a) / \lambda_1 + a}; \quad (6-36)$$

для параллельного соединения компонентов

$$\lambda = \lambda_1 \frac{100 - a}{100} + \lambda_2 \frac{a}{100}, \quad (6-37)$$

где a — пористость системы, % (отношение объема воздуха к объему твердого тела); λ_1 — коэффициент теплопроводности твердой фазы дисперсного материала; λ_2 — то же для жидкой или газообразной фазы.

Полагая в схеме рис. 1-6 толщину пленки $d_{\text{п}}=0$, получаем схему замещения многослойного бумажного диэлектрика. Применяя к ней (6-36), подставляя $a = 1 - \gamma_{\text{б}}/\gamma_{\text{к}}$ — в относительных единицах; $\lambda_1 = \lambda_{\text{к}}$ — коэффициент теплопроводности клетчатки, $\lambda_2 = \lambda_{\text{ж}}$ — то же пропиточной жидкости, получаем:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{к}}\lambda_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{к}}(1 - \gamma_{\text{б}}/\gamma_{\text{к}}) + \lambda_{\text{ж}}\gamma_{\text{б}}/\gamma_{\text{к}}} = \frac{\lambda_{\text{к}}\lambda_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{к}} - \gamma_{\text{б}}/\gamma_{\text{к}}(\lambda_{\text{к}} - \lambda_{\text{ж}})}. \quad (6-38)$$

У одиночного бумажного листа, особенно у бумаг пониженной плотности, возможно наличие некоторого количества сквозных пор. Поэтому ни последовательная, ни параллельная схема замещения не отражают реальной картины и не могут быть использованы для расчета его коэффициента теплопроводности. В [Л. 6-11] предложена более сложная схема замещения, представляющая комбинацию из параллельной и последовательной схемы (рис. 2-2).

Коэффициент теплопроводности такой системы рассчитывается по формуле

$$\lambda = \lambda_{\text{к}}V_{\text{п.к}} + \lambda_{\text{ж}}V_{\text{п.ж}} + \frac{(V_{\text{с.ж}} + V_{\text{с.к}})^2 \lambda_{\text{к}}\lambda_{\text{ж}}}{V_{\text{с.к}}\lambda_{\text{ж}} + V_{\text{с.ж}}\lambda_{\text{к}}} \quad (6-39)$$

(обозначения те же, что и на рис. 2-2).

6-5. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ СЕКЦИИ

Секция неоднородна по своим теплофизическим свойствам, теплопроводности отдельных ее участков различны. Их значение определяется расположением слоев бумаги и фольги по отношению к направлению теплоотвода, степенью сжатия секции, отношением толщины бумаги к толщине фольги и т. п. На пути теплового потока встречаются участки, где слои бумаги и фольги параллельны вектору теплового потока (зона параллельного теплоотвода) и где они ему перпендикулярны (зона перпендикулярного отвода, рис. 6-4,б). В зоне параллельного теплоотвода имеются три теплопроводящих слоя, расположенных параллельно вектору теплового

потока: фольга, пропитанная бумага и свободная пропиточная жидкость между листами бумаги с коэффициентами теплопроводности соответственно λ_{ϕ} , λ_{δ} и $\lambda_{ж}$. Конвективная теплопередача в свободной жидкости отсутствует ввиду малой толщины слоя. Обозначив эквивалентный коэффициент теплопроводности зоны параллельного теплоотвода через $\lambda_{\parallel}$ и применяя правило вычисления коэффициента теплопроводности сложных тел с параллельным расположением компонентов, найдем [Л. 6-12]:

$$\lambda_{\parallel} = \left[d_{\phi} \lambda_{\phi} + n d_1 \lambda_{\delta} + \frac{1-k}{k} n d_1 \lambda_{ж} \right] / (n d_1 / k + d_{\phi}). \quad (6-40)$$

Первый член числителя определяет теплопроводность через фольгу, второй — через пропитанную бумагу и третий — через свободную пропиточную жидкость. Учитывая, что $n d_1 / d_{\phi} = \xi$, получаем:

$$\lambda_{\parallel} = \left[\lambda_{\phi} + \left(\lambda_{\delta} + \frac{1-k}{k} \lambda_{ж} \right) \xi \right] / (\xi/k + 1). \quad (6-41)$$

При $k = 1$

$$\lambda_{\parallel} = (\lambda_{\phi} + \xi \lambda_{\delta}) / (\xi + 1). \quad (6-42)$$

Для зоны перпендикулярного теплоотвода эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\perp}$ равен:

$$\lambda_{\perp} = [(\xi/k + 1) \lambda_{\phi} \lambda_{\delta} \lambda_{ж}] / \left(\lambda_{\delta} \lambda_{ж} + \xi \lambda_{\phi} \lambda_{ж} + \frac{1-k}{k} \lambda_{\delta} \lambda_{\phi} \right). \quad (6-43)$$

При $k = 1$

$$\lambda_{\perp} = (\xi + 1) \lambda_{\phi} \lambda_{\delta} / (\lambda_{\delta} + \xi \lambda_{\phi}). \quad (6-44)$$

При использовании формулы (6-44) для вычисления $\lambda_{\perp}$ в боковых частях секции возникает дополнительная неточность, поскольку значение коэффициента запрессовки k в этих частях не может строго контролироваться.

Приблизленно значения $\lambda_{\parallel}$ и $\lambda_{\perp}$ могут быть подсчитаны по формулам, более удобным для практического применения [Л. 6-13]:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\parallel} &= \lambda_{\phi} / (\xi + 1); \\ \lambda_{\perp} &= \lambda_{\delta} (\xi + 1) / \xi. \end{aligned} \right\} \quad (6-45)$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности λ_3 закраины, имеющей ширину Δ_3 , подсчитывается по (6-41), как и $\lambda_{||}$, только вместо λ_ϕ подставляется значение $\lambda_{ж}$. При расчетах обычно принимается $\lambda_3 = \lambda_5$.

На рис. 6-4, а приведена схема секции со всеми ее размерами. Поместим в геометрический центр секции начало координат, направив оси y и z параллельно ее сторонам, а ось x перпендикулярно ее плоскости. Вдоль оси y теплопровод из секции сначала идет по участку с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{||}$, а затем по участку с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\perp}$, причем $\lambda_{||} \gg \lambda_{\perp}$. Вдоль оси z коэффициент теплопроводности равен $\lambda_{||}$ на всем протяжении активного объема. По оси x коэффициент теплопроводности равен $\lambda_{\perp}$. Используя методы теории теплопередачи, можно найти эквивалентный коэффициент теплопроводности λ_3 вдоль оси y , который согласно [Л. 6-13] равен:

$$\lambda_3 = (1 + b/\Delta_c)^2 \left/ \left[\frac{1}{\lambda_{||}} \left(\frac{b}{\Delta_c} \right)^2 + \frac{4}{\pi} \frac{b}{\Delta_c} \frac{1}{\lambda_{\perp}} + \frac{1}{2\lambda_{\perp}} \right] \right. \quad (6-46)$$

Для бумажно-пленочного диэлектрика по аналогии с вышеизложенным можно получить формулы для $\lambda_{||}$ и $\lambda_{\perp}$, аналогичные (6-41) и (6-43). Допустив, что коэффициенты теплопроводности пропитанной бумаги и пропиточной жидкости близки к $\lambda_{п}$ коэффициенту теплопроводности пленки, при $k=1$ получим:

$$\lambda_{||} = \lambda_\phi / (\xi_1 + 1); \quad (6-47)$$

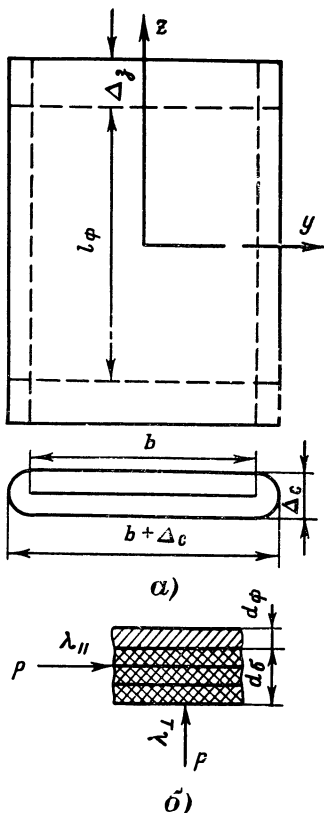


Рис. 6-4. Схема к расчету коэффициентов теплопроводности секции.

$$\lambda_{\perp} = (\xi_1 + 1)\lambda_{\parallel}/\xi_1, \quad (6-48)$$

где $\xi_1 = (nd_1 + n'd'_1)/d_{\phi}$.

При расчете λ_{Σ} для бумажно-плерочного диэлектрика используется (6-46), где $\lambda_{\parallel}$ и $\lambda_{\perp}$ подсчитываются по (6-47) и (6-48). Таким образом, активная часть секции имеет постоянные, но различные вдоль осей x, y, z коэффициенты теплопроводности $\lambda_x = \lambda_{\perp}$, $\lambda_y = \lambda_{\Sigma}$, $\lambda_z = \lambda_{\parallel}$.

Распределение коэффициентов теплопроводности вдоль осей определяется конструкцией пакета, т. е. расположением секций в нем. В табл. 6-2 приведены значения

Таблица 6-2
Зависимость коэффициентов теплопроводности секции от различных параметров [λ , Вт/(м·°С)]

ξ	w	$D_{\text{ш}}, \text{мм}$	$\lambda_{\parallel}$	λ_{Σ}	$\lambda_{\perp}$
4	10	40	40,1	6,13	0,21
		100		12,26	
	70	40		1,23	
		100		2,59	
10	10	40	18,3	2,78	0,187
		100		5,48	
	70	40		0,66	
		100		1,24	
15	10	40	12,7	0,187	0,182
		100		3,49	
	70	40		0,515	
		100		0,881	

чения коэффициентов теплопроводности секции вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений теплоотвода при различных параметрах секции.

Как видно из табл. 6-2, параметры секции оказывают заметное влияние на коэффициенты теплопроводности.

6-6. КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛООБМЕНА КОНДЕНСАТОРОВ С ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Для стабильной работы конденсатора необходимо, чтобы все выделяющееся в нем тепло передавалось охлаждающей среде. В процессе рассеивания тепла важную роль играют коэффициенты теплообмена. Основная масса силовых конденсаторов предназначена для работы при естественном воздушном охлаждении, осуществляемом за счет свободного движения воздуха вдоль охлаждаемой поверхности. Форма тела имеет малое влияние на процесс теплообмена; основное влияние оказывает протяженность поверхности, вдоль которой происходит движение охлаждающего воздуха. В конденсаторах с принудительным жидкостным охлаждением, охлаждающая жидкость, протекая по охлаждающей системе, отбирает практически все выделяемое в конденсаторе тепло. Ввиду сложности процесса движения охлаждающей среды около стенок и обусловленной этим сложностью явления теплопередачи теоретическое определение коэффициента теплообмена возможно только в немногих простейших случаях. Как правило, эта задача решается экспериментально.

Опыт показывает, что при всех практически встречающихся режимах работы силового конденсатора теплообмен с окружающей средой при естественном охлаждении происходит по закону Ньютона

$$P_p = \alpha_T S (t_k - t_0) \tau, \quad (6-49)$$

где P_p — количество рассеиваемого тепла; α_T — усредненный коэффициент теплоотдачи; S — размер теплорассеивающей поверхности; τ — время охлаждения; t_k — усредненная температура теплорассеивающей поверхности корпуса; t_0 — температура окружающей среды.

Коэффициент теплоотдачи α_T является суммой коэффициента теплоотдачи конвекцией α_k и коэффициента теплоотдачи излучением $\alpha_{и}$

$$\alpha_T = \alpha_k + \alpha_{и}. \quad (6-50)$$

Значение α_k связано с физическими параметрами охлаждающей среды и размерами охлаждаемого тела следующей зависимостью [Л. 6-14, 6-15]:

$$Nu_T = c (Gr Pr)^{n_T}, \quad (6-51)$$

где $Nu = \alpha_k l / \lambda$ — критерий Нуссельта для теплового подобия; $Gr = \beta \Delta t g l^3 / \nu^2$ — критерий Грасгофа для механического подобия движущейся охлаждающей среды, когда разность плотностей зависит от разности температур; $Pr = \nu / a$ — критерий Прандтля, характеризующий физические свойства охлаждающей среды; β — коэффициент объемного расширения охлаждающей среды (воздуха или жидкости); g — ускорение свободного падения; $\Delta t = t_k - t_0$ — температурный перепад; ν — кинематическая вязкость; a — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности; l — определяющий размер.

Определяющим размером для вертикальной стенки является ее высота, для горизонтально расположенного цилиндра — его диаметр. Физические параметры, входящие в формулу (6-51), выбирают при средней температуре t_T , равной

$$t_T = (t_k + t_0) / 2,$$

где t_k — температура охлаждаемой поверхности; t_0 — температура окружающей среды.

Постоянные c и n зависят от режима свободного движения воздуха (ламинарный, переходный или турбулентный). Они являются функциями $GrPr$ и находятся из табл. 6-3.

Таблица 6-3

Значения постоянных c и n

$GrPr$	c	n
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^3$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	1/3

Подставив в (6-51) значения критериев и решив его относительно α_k , получим:

$$\alpha_k = c (\beta g Pr_T)^n \left(\frac{\Delta t}{l^{1/n-3}} \right)^n \frac{\lambda_T}{\nu_T^{2n}}, \quad (6-52)$$

где $\Delta t = t_k - t_0$.

Расчет начинается с вычисления произведения $GrPr$, по которому из табл. 6-3 находятся значения c и n . Для

случая воздушного охлаждения физические параметры воздуха и значение R_g для данной температуры приведены в табл. 6-4 для диапазона температур от нуля до $+80^\circ\text{C}$. Значение α_k зависит от значения $\Delta t = t_k - t_0$, которое точно неизвестно и его приходится оценивать ориентировочно с последующим уточнением. Можно считать,

Таблица 6-4

Физические параметры сухого воздуха и воды

$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{кг/м}^3$	$c_p \cdot 10^3, \text{Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^4, \text{м}^2/\text{ч}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta, 1/^\circ\text{C}$	R_g
а) Воздуха при $p = 101324,72 \text{ Па}$								
-40	1,515	1,013	2,117	4,46	15,200	10,04	1/273	0,728
-30	1,453	1,013	2,198	5,37	15,691	14,80	1/273	0,723
-20	1,395	1,009	2,279	5,83	16,181	12,79	1/273	0,716
-10	1,342	1,009	2,361	6,28	16,671	12,43	1/273	0,712
0	1,293	1,005	2,442	6,77	17,162	13,28	1/273	0,707
10	1,247	1,005	2,512	7,22	17,652	14,16	1/273	0,705
20	1,205	1,005	2,593	7,71	18,142	15,06	1/273	0,703
30	1,115	1,005	2,675	8,23	18,633	16,00	1/273	0,701
40	1,128	1,005	2,756	8,75	19,123	16,96	1/273	0,699
50	1,093	1,005	2,826	9,26	19,613	17,95	1/273	0,698
60	1,060	1,005	2,896	9,79	20,104	18,97	1/273	0,696
70	1,029	1,009	2,966	10,28	20,594	20,02	1/273	0,694
80	1,000	1,009	3,047	10,87	21,084	21,09	1/273	0,692
б) Воды								
0	999,9	4,211	55,1	4,71	1787,8	1,789	-0,63	13,67
10	999,7	4,191	57,5	4,94	1305,3	1,306	+0,70	9,52
20	998,2	4,183	59,9	5,16	1004,2	1,006	1,82	7,02
30	995,7	4,174	61,8	5,35	801,2	0,805	3,21	5,42
40	992,2	4,174	63,4	5,51	653,1	0,659	3,87	4,31
50	988,1	4,174	64,8	5,65	549,2	0,556	4,49	3,54
60	983,2	4,178	65,9	5,78	469,7	0,479	5,11	2,98
70	977,8	4,186	66,8	5,87	406,0	0,415	5,70	2,55
80	971,8	4,195	67,5	5,96	355,0	0,365	6,32	2,21

Примечание. μ — кинематическая вязкость; c_p — теплоемкость при постоянном объеме.

что в силовых конденсаторах движение охлаждающего воздуха вдоль поверхности является турбулентным и для этого случая $s=0,135$ и $n=1/3$.

Коэффициент теплообмена горизонтальных теплорассеивающих плит приближенно можно рассчитывать также по (6-52). В качестве определяющего размера берет-

ся меньшая сторона плиты. Для теплорассеивающей поверхности, обращенной кверху, полученное значение α_k увеличивается на 30%, а у обращенной книзу — уменьшается на 30%.

Для вычисления значения α_k вертикально расположенных цилиндров в [Л. 1-1] рекомендуется формула

$$\alpha_k = 5,888 (\Delta t / D)^{1/4}, \quad (6-53)$$

где D — диаметр цилиндра, мм; Δt — перепад температуры, °С; δ — коэффициент, зависящий от высоты цилиндра H , мм; его значения составляют:

H , мм	>500	500	300
δ	1	1,01	1,07

Значение α_k в (6-53) выражается в Вт/(м²·°С).

Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{и}$ связан с физическими характеристиками излучающего тела, его температурой и температурой окружающей среды соотношением, следующим из закона Стефана — Больцмана:

$$\alpha_{и} = \frac{\varepsilon^* C_0}{T_k - T_0} \left[\left(\frac{T_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (6-54)$$

где $C_0 = 5,77$ Вт/(м²·К⁴) — константа излучения абсолютного черного тела; ε^* — степень черноты данного тела (стенки корпуса); $T_k = 273 + t_k$ — абсолютная температура излучающей стенки (t_k — температура ее, °С); $T_0 = 273 + t_0$ — то же окружающей среды. Значение $\alpha_{и}$ в (6-54) получается в Вт/(м²·°С).

Степень черноты ε^* тела или поверхности характеризует излучательную способность его по отношению к абсолютно черному телу. Значения ε^* для различных тел приведены в табл. 6-5. Значение ε^* некрашенных металлических поверхностей в сильной мере зависит от их состояния (полировка, шероховатость, наличие ржавчины и т. п.), и оно значительно меньше, чем для тех же поверхностей, но окрашенных. Поэтому окраска силовых конденсаторов является обязательной. Из табл. 6-5 видно, что для всех красок, не содержащих металлы, независимо от их цвета степень черноты $\varepsilon^* \approx 0,85 \div 0,95$ и в среднем $\varepsilon^* \approx 0,9$. Объясняется это тем, что во всем диапазоне рабочих температур конденсатора максимум общего излучения лежит в далекой инфракрасной части спектра, т. е. далеко в области теплового излучения. Поэтому цвет краски не оказывает влияния на коэффициент теплоотдачи излучением. Однако для конденсаторов,

Таблица 6-5

Степень черноты различных материалов

Материал	ϵ^*
Сталь полированная	0,052—0,064
Сталь вальцованная	0,7—0,8
Сталь оцинкованная	0,22—0,28
Сталь, покрытая бесцветным лаком	0,87
Алюминий шероховатый	0,055
Алюминий полированный	0,039—0,05
Дерево	0,8—0,94
Бумага	0,8—0,95
Фарфор глазурованный	0,92—0,94
Масло	0,93
Краски масляные любых цветов	0,98—0,97
Эмали, лаки	0,85—0,95
Эмалевый лак, снежно-белый	0,9
Лак черный, матовый	0,97
Алюминиево-бронзовая краска	0,2—0,45
Лак бакелитовый	0,935

подверженных при работе прямому облучению солнечной радиацией, максимум интенсивности которой находится вблизи видимой части спектра, цвет окраски имеет существенное значение. Эти конденсаторы должны быть окрашены в светлые тона, поскольку при такой окраске солнечные лучи хорошо отражаются и коэффициент теплоотдачи излучением внутреннего тепла практически не изменяется.

Подставив полученные значения α_k и $\alpha_{и}$ в (6-50), найдем значение коэффициента теплоотдачи α_T . Для расчета α_T конденсаторов с высотой корпуса $H=350$ мм предложена следующая эмпирическая формула [Л. 1-1]

$$\alpha_T = (9,5 + 0,39\Delta t), \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}, \quad (6-55)$$

которая справедлива в диапазоне температур $5^\circ\text{С} \leq \Delta t \leq 20^\circ\text{С}$. В практических расчетах в первом приближении обычно принимается $\alpha_T = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$, а затем данные расчета уточняются экспериментальной проверкой.

Коэффициент теплоотдачи α_T можно увеличить форсированием охлаждения за счет применения корпусов с дополнительными охлаждающими ребрами или их обдува. Практически более простым и удобным является применение обдува. Для вычисления коэффициента теп-

лоотдачи в этом случае используется предложенное М. А. Михеевым критериальное уравнение [Л. 6-15]

$$Nu_0 = 0,032 Re_0^{0,8}, \quad (6-56)$$

где $Re = vl/\nu$ — критерий Рейнольдса; v — скорость движения воздуха, м/с; ν — кинематическая вязкость воздуха; l — определяющий размер; значения параметров, входящих в критерии Nu и Re , берутся для температуры воздуха t_0 .

Подставляя в (6-56) значения критериев Nu и Re и решая относительно α_k , получаем:

$$\alpha_k = B_1 v^{0,8} / l^{0,2}, \quad (6-57)$$

где $B_1 = 3,2 \cdot 10^{-2} \lambda / \nu^{0,8}$.

Значения B_1 приведены в табл. 6-6.

Таблица 6-6

Значение B_1 при различных температурах

$t_0, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
B_1	98,4	96,5	94,2	92,8	91,6	89,4	87,9	86,1	84,7

В (6-57) l подставляется в метрах, а v — в м/с. Значение α_k получается в Вт/(м²·°С). Принудительное охлаждение обычно применяется для конденсаторов, устанавливаемых в батареях. Конструктивное решение вопроса о принудительном охлаждении конденсаторных батарей может быть различным.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи в конденсаторах с принудительным водяным охлаждением также применяются критериальные уравнения. Поскольку охлаждающая система имеет форму плоского змеевика, для которого критериальные уравнения составить затруднительно, коэффициент теплоотдачи определяется в предположении, что труба прямая, а в полученное значение вводится поправка на наличие изгибов. Связь коэффициента теплоотдачи с физическими параметрами охлаждающей жидкости, скоростью ее движения и диаметром трубки выражается следующим уравнением из [Л. 6-14]:

$$Nu_c = 2,3 \cdot 10^{-2} Re_c^{0,8} Pr_c^{0,4}. \quad (6-58)$$

Индекс «с» означает, что значения физических параметров, входящих в критерии, берутся для средней температуры охлаждающей жидкости, определяемой как среднее между входной и выходной температурой охлаждающей воды. За определяющий размер принимают диаметр трубки. После подстановки в (6-58) соответствующих значений критериев, приняв плотность воды равной единице и проведя ряд преобразований, получим:

$$\alpha_k = Bv^{0,8}/d^{0,2}, \quad (6-59)$$

где d — диаметр трубы, м; v — скорость движения воды, м/с.

Значение α_k в (6-59) выражено в Вт/(м²·°С).

Коэффициент B для воды берется из табл. 6-7.

Таблица 6-7

Коэффициент B для воды

$t_0, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80
B	5,70	7,48	9,26	10,80	12,2

Полученное из (6-59) значение α_k следует умножить на поправочный коэффициент ξ_2 , учитывающий наличие закруглений:

$$\xi_2 = 1 + 1,77d/R, \quad (6-60)$$

где R — радиус закругления змеевика.

Глава седьмая

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОНДЕНСАТОРА

7-1. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА И УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Тепловой расчет является важной составной частью общего расчета силового конденсатора. Задачи, которые могут решаться в процессе теплового расчета, имеют двойкий характер. Одна из задач состоит в нахождении распределения температуры и точки максимального нагрева диэлектрика при заданных конструкции и свойствах материалов. Другая, более сложная задача состоит в том, чтобы, исходя из заданных режимов, условий эксплуатации и свойств активных материалов, создать опти-

мальную по тепловым характеристикам конструкцию конденсатора, обеспечивающую для конкретных условий экономически целесообразный срок службы при минимуме затрат. Основная цель теплового расчета состоит

в выявлении распределения температуры внутри конденсатора. Для этой цели используются уравнения теплопроводности применительно к конкретным конструкциям конденсаторов.

подавляющее большинство конструкций конденсаторов имеет форму прямоугольного параллелепипеда (рис. 7-1а, б), большую долю внутреннего объема которого занимает пакет. Активную часть пакета в первом приближении будем рассматривать как сплошную среду с границей Γ_1 (рис. 7-1, в), пренебрегая наличием прокладок и холостых витков, поскольку доля их незначительна. По активному объему практически равномерно распределены внутренние источники тепла. Коэффициенты теплопроводности $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ вдоль осей x, y, z постоянны и различны. Активный объем окружен слоем тепловой изоляции O_2 . Теплообмен с окружа-

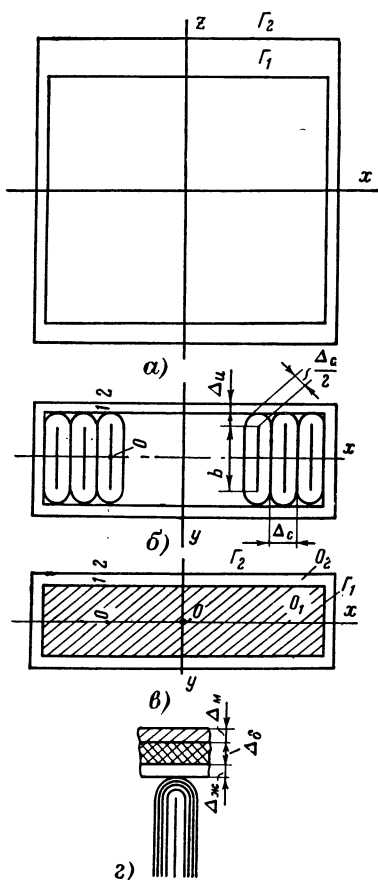


Рис. 7-1. Схема к тепловому расчету силового конденсатора.

ющей средой осуществляется через внешние поверхности границы Γ_2 (корпуса). У конденсаторов с водяным охлаждением практически все образующееся в активном объеме тепло движется в направлении охлаждающей системы и отбирается ею. Особенности конструкции и расчета таких конденсаторов будут рассмотрены в § 7-6. Здесь

рассматривается тепловой расчет конденсаторов с воздушным охлаждением.

Изоляцией пакета от корпуса обычно служит пропитанная кабельная бумага (рис. 7-1,з). На рисунке обозначено: Δ_m — толщина стенки корпуса, Δ_b — суммарная толщина пропитанной бумаги, $\Delta_{ж}$ — суммарная толщина прослойки пропиточной жидкости. При расчетах весь этот комплекс принято характеризовать одним эквивалентным коэффициентом теплопроводности λ_n , вычисляемым по формуле

$$\lambda_n = \frac{\Delta_n}{(\Delta_m/\lambda_m + \Delta_b/\lambda_b + \Delta_{ж}/\lambda_{ж})}, \quad (7-1)$$

где λ_m — коэффициент теплопроводности материала корпуса; λ_b — коэффициент теплопроводности пропитанной кабельной бумаги; $\lambda_{ж}$ — коэффициент теплопроводности пропиточной жидкости; Δ_n — суммарная толщина эквивалентного слоя, равная полуразности внешних размеров корпуса и пакета.

При этом предполагается, что толщина изоляции одинакова во всех точках и боковая поверхность корпуса равна аналогичной поверхности слоев в жидкости и пропитанной кабельной бумаге.

Поместим начало координат в геометрический центр корпуса, как это показано на рис. 7-1. В стационарном режиме температура t в активной части O_1 удовлетворяет уравнению теплопроводности в анизотропной среде [Л. 7-1—7-3] (предполагается, что окружающая температура $t_0=0$)

$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = -P_{уд}, \quad (7-2)$$

а температуры t_n в приведенном изоляционном слое O_2 при том же предположении — уравнению

$$\frac{\partial^2 t_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_n}{\partial z^2} = 0. \quad (7-3)$$

Картину распределения температурного поля в конденсаторе дает совместное решение (7-2) и (7-3) с учетом условий его охлаждения, выражаемых через краевые условия. Будем рассматривать одиночный конденсатор, все стороны которого в одинаковой мере подвержены воздействию охлаждающей среды. Тогда математически задача определения температурного поля формулируется

следующим образом: требуется найти непрерывную функцию

$$\Phi = \begin{cases} t & \text{в } O_1; \\ t_n & \text{в } O_2, \end{cases} \quad (7-4)$$

удовлетворяющую (7-2) и (7-3) и краевым условиям:

а) условию теплообмена на границе Γ_2 области O_2 , включающей область O_1

$$\lambda_n \frac{\partial t_n(x, y, z)}{\partial n} \pm \alpha t_n(x, y, z) = 0, \quad (7-5)$$

где α — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; n — нормаль к поверхности теплорассеяния в данной точке.

Координаты x, y, z включают границу Γ_2 ;

б) условию сопряжения температур и теплового потока на границе Γ_1

$$t(x, y, z) = t_n(x, y, z); \quad (7-6)$$

$$\lambda_x \frac{\partial t(x, y, z)}{\partial x} = \lambda_n \frac{\partial t_n(x, y, z)}{\partial x}; \quad (7-7)$$

$$\lambda_y \frac{\partial t(x, y, z)}{\partial y} = \lambda_n \frac{\partial t_n(x, y, z)}{\partial y}; \quad (7-8)$$

$$\lambda_z \frac{\partial t(x, y, z)}{\partial z} = \lambda_n \frac{\partial t_n(x, y, z)}{\partial z}. \quad (7-9)$$

В (7-6) — (7-9) координаты x, y, z включают границу Γ_1 . Распределение температуры в плоскости xy сечения симметрично относительно его центра для любого значения z , т. е.

$$t(x; y)_z = t(-x, -y)_z. \quad (7-10)$$

Распределение температуры в пакете реального конденсатора по его высоте (вдоль оси z) не является симметричным относительно центра. Причиной этого являются различная теплоотдача дна и крышки, внутренняя асимметрия конструкции, а также неодинаковость условий охлаждения нижней и верхней части вертикальной стенки. Опытным путем установлено, что у реального конденсатора, стоящего на нетеплопроводящем основании, точка максимальной температуры находится в середине пакета на расстоянии около $2/3$ его высоты, считая от основания.

Нестационарное температурное поле в конденсаторе описывается уравнениями нестационарной теплопроводности. Для объема O_1 оно имеет вид:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + P_{уд} = c_T \gamma \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (7-11)$$

а для объема O_2

$$\lambda_n \left(\frac{\partial^2 t_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_n}{\partial z^2} \right) = c_{IT} \gamma_1 \frac{\partial t_n}{\partial \tau}, \quad (7-12)$$

где τ — время; c_T — теплоемкость; γ — плотность материала.

Для силового конденсатора

$$c_T = \sum_{i=1}^n m_i c_{iT} \left/ \sum_{i=1}^n m_i = \sum_{i=1}^n V_i \gamma_i c_{iT} \right/ \sum_{i=1}^n V_i \gamma_i; \quad (7-13)$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (7-14)$$

где m_i — масса; V_i — объем; γ_i — плотность i -го компонента конденсаторных материалов.

При определении c_T и γ в (7-11) учитываются материалы активного объема — конденсаторная бумага или пленка, пропитывающая жидкость и фольга, а для c_{iT} и γ_i в (7-12) — материалы, образующие изоляцию пакета от корпуса, и материал корпуса. Значение $P_{уд}$ в (7-11) в общем случае является функцией температуры. Распределение нестационарного температурного поля в конденсаторе может быть найдено из совместного решения уравнений (7-11), (7-12) с учетом краевых условий (7-5) — (7-10) и начального условия: при $\tau=0$ $t=t_0$.

7-2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СИЛОВОМ КОНДЕНСАТОРЕ

Точное аналитическое решение задачи определения температурного поля в конденсаторе возможно только в отдельных частных случаях. В [Л. 7-4] дано точное аналитическое решение задачи о распределении температуры в бесконечно высокой анизотропной призме четырехугольного сечения с равномерно распределенными внутрен-

ними источниками тепла, представляющей интерес и для силового конденсаторостроения, поскольку распределение температуры в конденсаторе может быть найдено с использованием методов, примененных в данной задаче. Ниже рассматривается сокращенное изложение этого решения.

На рис 7-2,а приведено поперечное сечение призмы и расположение осей координат. В стационарном режиме распределение температуры t в сечении описывается уравнением (в предположении, что окружающая температура $t_0=0$)

$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = -P_{уд}, \quad (7-15)$$

решение которого должно удовлетворять крайевым условиям:

$$\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} + \alpha_x t = 0; \quad (7-16)$$

$$\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} + \alpha_y t = 0. \quad (7-17)$$

В дальнейшем принимается, что $P_{уд}$, λ_x , λ_y , α_x и α_y не зависят от температуры.

Преобразуя рассматриваемую область в изотропную с использованием метода подобия, (7-15) можно привести к виду

$$\partial^2 t_{п} / \partial x_{п}^2 + \partial^2 t_{п} / \partial y_{п}^2 = -P_{уд.п} / \lambda_{п}, \quad (7-18)$$

в которой индекс «п» показывает, что значения относятся к преобразованной изотропной области.

В качестве коэффициентов подобия принимаются следующие:

$$\left. \begin{aligned} k_x &= x/x_{п}; \quad k_y = y/y_{п}; \quad k_{\lambda x} = \lambda_x/\lambda_{п}; \\ k_{\lambda y} &= \lambda_y/\lambda_{п}; \quad k_P = P_{уд}/P_{уд.п}; \quad k_t = t/t_{п}, \end{aligned} \right\} \quad (7-19)$$

которые считаются постоянными.

С учетом этих коэффициентов (7-15) преобразуется к виду

$$\frac{k_{\lambda x}}{k^2_x} \lambda_{п} \frac{\partial^2 t_{п}}{\partial x_{п}^2} + \frac{k_{\lambda y}}{k^2_y} \lambda_{п} \frac{\partial^2 t_{п}}{\partial y_{п}^2} = -k_P P_{уд.п}. \quad (7-20)$$

Процессы, описываемые (7-15), (7-18) и (7-20), будут подобными, если уравнения тождественны. Уравнения (7-18) и (7-20) будут тождественными при выполнении условий:

$$k_{\lambda x} / k^2_x = k_{\lambda y} / k^2_y = k_P \quad \text{или} \quad \lambda_x / k^2_x = \lambda_y / k^2_y = \lambda_{п} k_P, \quad (7-21)$$

откуда следует, что

$$k_x = \sqrt{\lambda_x / \lambda_{п} k_P}; \quad k_y = \sqrt{\lambda_y / \lambda_{п} k_P}. \quad (7-22)$$

Таким образом, для координат преобразованной области x_{Π} и y_{Π} имеем их выражения через координаты исходной области и параметры k_P и λ :

$$x_{\Pi} = x \sqrt{\lambda_{\Pi} k_P} / \sqrt{\lambda_x}; \quad (7-23)$$

$$y_{\Pi} = y \sqrt{\lambda_{\Pi} k_P} / \sqrt{\lambda_y}. \quad (7-24)$$

Краевые условия для преобразованной области имеют вид:

$$\lambda_{\Pi} \partial t_{\Pi} / \partial x_{\Pi} + \alpha_{x\Pi} t_{\Pi} = 0; \quad (7-25)$$

$$\lambda_{\Pi} \frac{\partial t_{\Pi}}{\partial y_{\Pi}} + \alpha_{y\Pi} t_{\Pi} = 0. \quad (7-26)$$

Принимая коэффициенты подобия

$$k_{\alpha x} = \alpha_x / \alpha_{x\Pi}; \quad (7-27)$$

$$k_{\alpha y} = \alpha_y / \alpha_{y\Pi} \quad (7-28)$$

и преобразуя (7-16), (7-17), получаем:

$$\frac{k_{\lambda x}}{k_x} \lambda_{\Pi} \frac{\partial t_{\Pi}}{\partial x_{\Pi}} + k_{\alpha x} \alpha_{x\Pi} t_{\Pi} = 0; \quad (7-29)$$

$$\frac{k_{\lambda y}}{k_y} \lambda_{\Pi} \frac{\partial t_{\Pi}}{\partial y_{\Pi}} + k_{\alpha y} \alpha_{y\Pi} t_{\Pi} = 0. \quad (7-30)$$

Физические процессы на границе области, описываемые уравнениями (7-25), (7-26) и (7-29), (7-30), будут подобны только тогда, когда соответствующие уравнения будут тождественны. Для тождественности уравнений необходимо, чтобы

$$\left. \begin{aligned} k_{\lambda x} / k_x &= k_{\alpha x}; \quad k_{\lambda y} / k_y = k_{\alpha y}; \\ k_{\alpha x} &= \frac{\sqrt{\lambda_x}}{\sqrt{\lambda_{\Pi}}} \sqrt{k_P}; \quad k_{\alpha y} = \frac{\sqrt{\lambda_y}}{\sqrt{\lambda_{\Pi}}} \sqrt{k_P}. \end{aligned} \right\} \quad (7-31)$$

Подставляя в (7-31) вместо $k_{\alpha x}$ и $k_{\alpha y}$ их выражения (7-27), (7-28), получаем значения коэффициентов теплоотдачи преобразованной области:

$$\alpha_{x\Pi} = \frac{\sqrt{\lambda_{\Pi}}}{\sqrt{\lambda_x k_P}} \alpha_x; \quad \alpha_{y\Pi} = \frac{\sqrt{\lambda_{\Pi}}}{\sqrt{\lambda_y k_P}} \alpha_y. \quad (7-32)$$

Условия (7-21) и (7-22) могут быть выполнены при любых, произвольно выбранных значениях k_P и λ_{Π} . Их целесообразно выбрать так, чтобы координата x после преобразования не изменялась, а коэффициент теплопроводности вдоль этой оси после преобразования был равен единице, что имеет место при выполнении следующих условий:

$$\lambda_{\Pi} = 1; \quad k_P = \lambda_x. \quad (7-33)$$

В этом случае параметры преобразованной области имеют вид:

$$P_{уд.\Pi} = P_{уд} / \lambda_x; \quad \alpha_{x\Pi} = \alpha_x / \lambda_x; \quad \alpha_{y\Pi} = \alpha_y / \sqrt{\lambda_x \lambda_y}. \quad (7-34)$$

По этим же формулам производится и изотропизирующее преобразование.

На рис. 7-2,б показана преобразованная изотропная область для случая, когда коэффициенты теплоотдачи противоположных стенок одинаковы. Распределение температуры в ней описывается (7-18) при краевых условиях, характеризующих теплообмен на границе конденсатор — окружающая среда:

$$\left(\frac{\partial t_n}{\partial x_n} \mp h_1 t_n \right)_{\substack{x_n=0 \\ x_n=a_n}} = 0; \quad h_1 = \frac{\alpha_{x_n}}{\lambda_n}; \quad (7-35)$$

$$\left(\frac{\partial t_n}{\partial y_n} \mp h_2 t_n \right)_{\substack{y_n=0 \\ y_n=b_n}} = 0; \quad h_2 = \frac{\alpha_{y_n}}{\lambda_n}. \quad (7-36)$$

Решение (7-18) при этих условиях находим в виде произведения функций

$$t_n = \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x_n) Y_i(y_n). \quad (7-37)$$

Оно дает следующее выражение, описывающее распределение температуры t_n в преобразованной области:

$$t_n = 2P_{уд.н} a_n \sum_{i=1}^{\infty} \frac{M_i N_i L_i}{m_i^2}, \quad (7-38)$$

где

$$M_i = \frac{\sin m_i + (a_n h_1 / m_i) (1 - \cos m_i)}{m_i [1 + (a_n h_1 / m_i)^2] + [1 - (a_n h_1 / m_i)^2] \sin m_i \cos m_i + 2 (a_n h_1 / m_i) \sin^2 m_i}; \quad (7-39)$$

$$N_i = \frac{a_n h_1}{m_i} \sin \left(\frac{m_i}{a_n} x_n \right) + \cos \left(\frac{m_i}{a_n} x_n \right); \quad (7-40)$$

$$L_i = K_i \operatorname{sh} \left(\frac{m_i}{a_n} y_n \right) + \left(\frac{m_i}{a_n h_2} K_i - 1 \right) \operatorname{ch} \left(\frac{m_i}{a_n} y_n \right) + 1; \quad (7-41)$$

$$K_i = \frac{\frac{m_i}{a_n h_2} \operatorname{sh} \left(m_i \frac{b_n}{a_n} \right) + \operatorname{ch} \left(m_i \frac{b_n}{a_n} \right) - 1}{\left[\left(\frac{m_i}{a_n h_2} \right)^2 + 1 \right] \operatorname{sh} \left(m_i \frac{b_n}{a_n} \right) + 2 \frac{m_i}{a_n h_2} \operatorname{ch} \left(m_i \frac{b_n}{a_n} \right)}. \quad (7-42)$$

Значения m_i находятся графически из уравнения

$$\operatorname{ctg} m_i = \frac{m_i}{2a_n h_1} \left[1 - \left(\frac{a_n h_1}{m_i} \right)^2 \right] \quad (7-43)$$

или методом итераций по формулам:

$$m_i = (i + 1) \pi - 2 \operatorname{arctg} \frac{m_i}{a_n h_1} \quad (7-44)$$

при $a_{\Pi} h_1 < m_i$;

$$m_i = (i-1)\pi - 2 \operatorname{arctg} \frac{a_{\Pi} h_1}{m_i} \quad (7-45)$$

при $a_{\Pi} h_1 > m_i$.

Максимальная температура $t_{\max}$ в точке $x_{\Pi} = a_{\Pi}/2$ и $y_{\Pi} = b_{\Pi}/2$ находится по формуле

$$t_{\max} = 2P_{\text{уд.}} \pi a_{\Pi}^2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{P_i Q_i}{m_i^2}, \quad (7-46)$$

где

$$P_i = \frac{2 \sin\left(\frac{m_i}{2}\right) R_i}{m_i \left[1 + \left(\frac{a_{\Pi} h_1}{m_i}\right)^2 \right] + 2 \sin\left(\frac{m_i}{2}\right) \cos\left(\frac{m_i}{2}\right) (R_i - S_i)}; \quad (7-47)$$

$$Q_i = 1 - \frac{1}{\frac{m_i}{a_{\Pi} h_2} \operatorname{sh}\left(\frac{m_i}{2} \frac{b_{\Pi}}{a_{\Pi}}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{m_i}{2} \frac{b_{\Pi}}{a_{\Pi}}\right)}; \quad (7-48)$$

$$R_i = \frac{a_{\Pi} h_1}{m_i} \sin \frac{m_i}{2} + \cos \frac{m_i}{2}; \quad (7-49)$$

$$S_i = \sin \frac{m_i}{2} - \frac{a_{\Pi} h_1}{m_i} \cos \frac{m_i}{2}. \quad (7-50)$$

Формула (7-38) позволяет рассчитать температурное поле в приведенной изотропной области. Распределение температуры в исходной области находится после обратного преобразования координат по формулам:

$$x = x_{\Pi}; \quad (7-51)$$

$$y = \sqrt{\lambda_y / \lambda_x} y_{\Pi}. \quad (7-52)$$

Для определения максимального значения температуры в центре сечения обратное преобразование координат не требуется и может быть произведено по (7-46). В практических расчетах можно пользоваться номограммами, построенными на основе изложенного метода. Численную картину температурного поля можно получить, используя численные методы интегрирования дифференциальных уравнений и современную вычислительную технику. Возникающая при этом погрешность зависит от выбора точек и их числа.

7-3. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Как видно из вышеизложенного, применение точных решений для определения температурного поля в конденсаторе весьма громоздко. Поэтому на практике пользуются приближенными методами.

В основе приближенного метода теплового расчета [Л. 1-9; 7-5] лежит упрощающее допущение о том, что

выделяемое в конденсаторе тепло отводится только в направлении, перпендикулярном его боковым плоскостям. Это допущение близко к истине для конденсатора, стоящего на нетеплопроводящем основании. Теплоотдачей крышки можно пренебречь, так как значительная ее часть занята изоляторами. Далее предполагается, что граница активной части пакета и внешняя поверхность корпуса является изотермическими поверхностями, т. е. градиент температуры по высоте (оси z) равен нулю. Тогда распределение температуры в активной части конденсатора — на участке $0-1$ (рис. 7-1, б, в) — описывается одномерным дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\lambda_3 \frac{d^2 t}{dy^2} + P_{уд} = 0, \quad (7-53)$$

в котором λ_3 вычисляется по (6-46), а $P_{уд}$ — по (6-3).

Принимается, что $P_{уд}$ не зависит от температуры. После интегрирования (7-53) получим:

$$\lambda_3 t + P_{уд} \frac{y^2}{2} = A_1 y + A_2. \quad (7-54)$$

Постоянные A_1 и A_2 определяются из условий: при $y=0$

$$t = t_{\text{макс}} \text{ и } dt/dy = 0.$$

В этом случае $A_2 = \lambda_3 t_{\text{макс}}$ и $A_1 = 0$ и (7-54) принимает вид:

$$t = t_{\text{макс}} - \frac{P_{уд}}{2\lambda_3} y^2. \quad (7-55)$$

При $y = \frac{b+\Delta}{2} t = t_1$ (t_1 — температура на границе раздела активного объема и изоляции от корпуса — первая изотермическая поверхность), найдем перепад температуры Δt_1 в активной части изоляции

$$\Delta t_1 = t_{\text{макс}} - t_1 = \frac{P_{уд}}{2\lambda_3} \left(\frac{b+\Delta}{2} \right)^2. \quad (7-56)$$

Для определения температуры в приведенном изоляционном слое $\Delta_{\text{и}}$ (участок $1-2$, рис. 7-1, б, в) введем новую переменную $y' = y - (b+\Delta)/2$ и поместим начало координат в точку 1. Тогда распределение температуры

в нем будет описываться уравнением

$$\lambda_n \frac{dt}{dy'} + P_{уд} \left(\frac{b + \Delta}{2} \right) = 0. \quad (7-57)$$

Его интегрирование дает:

$$\lambda_n t + P_{уд} \left(\frac{b + \Delta}{2} \right) y' = A. \quad (7-58)$$

Из (7-58) при условии $y' = 0$, $t = t_1$ находим $A = \lambda_n t_1$, что далее позволяет найти температуру для любого значения координаты y' :

$$t = t_1 - P_{уд} \frac{b + \Delta}{2} y'. \quad (7-59)$$

При $y' = \Delta_n$ $t = t_2 = t_k$, здесь t_k — температура на внешней поверхности корпуса конденсатора (вторая изотермическая поверхность). Перепад температуры Δt_2 в изоляции пакета от корпуса составляет:

$$\Delta t_2 = t_1 - t_k = P_{уд} \frac{b + \Delta}{2\lambda_n} \Delta_n. \quad (7-60)$$

Перепад температуры Δt_3 от стенки корпуса к окружающей среде находится по (6-49), преобразованной к виду

$$\Delta t_3 = t_k - t_0 = \frac{P_k}{\alpha_T S} = \frac{2\pi f C_k U^2 \operatorname{tg} \delta}{\alpha_T S}. \quad (7-61)$$

Суммарный перепад температуры Δt между центром секции и окружающей средой равен сумме перепадов по участкам 0—1; 1—2; 2—3:

$$\begin{aligned} \Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = t_{\max} - t_0 = P_{уд} \frac{(b + \Delta)^2}{8\lambda_s} + \\ + P_{уд} \frac{b + \Delta}{2\lambda_n} \Delta_n + \frac{2\pi f C_k U^2 \operatorname{tg} \delta}{\alpha_T S}. \end{aligned} \quad (7-62)$$

Заменив в последнем слагаемом $P_k = P_{уд} V_a$, а затем поделив числитель и знаменатель на V_a и обозначив $S/V_a = S_0$, которую назовем удельной рассеивающей поверхностью, получим:

$$t_{\max} = t_0 + P_{уд} \left[\frac{(b + \Delta)^2}{8\lambda_s} + \frac{b + \Delta}{2\lambda_n} \Delta_n + \frac{1}{\alpha_T S_0} \right]. \quad (7-63)$$

Из (7-63) следует, что температура в диэлектрике зависит не только от теплофизических характеристик материалов и размеров секции, но и от удельной рассеивающей поверхности, т. е. геометрии конденсатора.

Помимо изложенного выше метода теплового расчета, существует другой приближенный метод [Л. 7-6], основанный на использовании (7-38). Особенность этого метода состоит в том, что схема реального конденсатора (рис. 7-1,з), содержащая изоляцию пакета от корпуса, приводится к схеме без такой изоляции (рис. 7-2,б), наличие которой, однако, учитывается приведенным коэффициентом теплоотдачи α' , который связан с параметрами приводимого изоляционного слоя и действительным коэффициентом теплоотдачи стенок корпуса α соотношением [Л. 7-7]

$$\alpha' = \lambda_{и} \alpha / (\Delta_{и} \alpha + \lambda_{и}). \quad (7-64)$$

Размер приведенной теплорассеивающей поверхности конденсатора уменьшается по сравнению с действительной. Обозначим высоту корпуса через H , ширину его основания через A и его длину через B , а размеры сечения активной части соответственно через A_1 и B_1 (высоту ее будем считать равной H). Тогда площадь боковой поверхности до приведения равна:

$$S = 2(A+B)H,$$

а после приведения

$$S_1 = 2(A_1+B_1)H.$$

Количество тепла, рассеиваемого приведенной поверхностью, должно быть равно количеству тепла, рассеиваемого реальной поверхностью, т. е. должно соблюдаться соотношение

$$S\alpha'(t_k - t_0) = S_1\alpha''(t_k - t_0), \quad (7-65)$$

где α'' — коэффициент теплоотдачи, учитывающий уменьшение поверхности,

$$\alpha'' = \alpha'(A+B)/(A_1+B_1). \quad (7-66)$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках (7-63), представляет собой полное тепловое сопротивление конденсатора R_T и постоянно по значению, если коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи не зависят от температуры. Перепад температуры между наиболее нагретой точкой конденсатора и окружающей средой Δt является линейной функцией потерь мощности

$$\Delta t = P_{уд} R_T = P_K R_T / V_a = P_K / \Lambda, \quad (7-67)$$

где $\Lambda = V_a / R_T$ — параметр, характеризующий тепловую проводимость конденсатора; $P_K = 2\pi f C_K U^2 \operatorname{tg} \delta$ — диэлек-

трические потери в конденсаторе, которым пропорционально количество выделяемого в нем тепла.

Экспериментальные данные подтверждают линейную закономерность (7-67). Проследим связь между тепловыми характеристиками конденсаторов, качеством активных материалов и допустимыми нагрузками на изоляцию. Для этой цели воспользуемся выражением (6-2), характеризующим потери в активной изоляции конденсатора. Умножая правую часть этого уравнения на

$$\frac{C_K}{C_{\text{ном}}} \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2, \text{ получаем:}$$

$$P_K = 2\pi f C_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \frac{C_K}{C_{\text{ном}}} \operatorname{tg} \delta = Q_{\text{ном}} k_U k_C \operatorname{tg} \delta, \quad (7-68)$$

где $Q_{\text{ном}} = 2\pi f C_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2$ — номинальная реактивная мощность конденсатора; $k_U = (U/U_{\text{ном}})^2$ — коэффициент нагрузки конденсатора по напряжению; $k_C = C_K/C_{\text{ном}}$ — коэффициент отклонения емкости. В (7-68) $\psi = k_C \operatorname{tg} \delta$ — коэффициент потерь в диэлектрике — является функцией только его температуры. Значение k_U является регулируемым параметром, не зависящим от температуры. Подставив (7-68) в (7-67), найдем связь перепада температуры с коэффициентом потерь:

$$\Delta t = \frac{Q_{\text{ном}}}{\Lambda} k_U k_C \operatorname{tg} \delta = \frac{Q_{\text{ном}}}{\Lambda} k_U \psi. \quad (7-69)$$

Полагая перепад температуры в конденсаторе равным наибольшему длительно допустимому Δt_d , из (7-69) находим значение номинальной реактивной мощности конденсатора

$$Q_{\text{ном}} = \Lambda \Delta t_d / k_U k_C \operatorname{tg} \delta. \quad (7-70)$$

Из (7-70) видно, что увеличение $Q_{\text{ном}}$ может быть достигнуто за счет увеличения Λ , характеризующей тепловую проводимость конструкции, уменьшения коэффициента колебания напряжения k_U и за счет увеличения отношения

$$M_p = \Delta t_d / k_C \operatorname{tg} \delta, \quad (7-71)$$

которое называется показателем мощности.

Значение коэффициента потерь $k_C \operatorname{tg} \delta$ берется для точки, соответствующей максимальной длительно допустимой температуре $t_{\text{макс}} = t_0 + \Delta t_d$. Повышение M_p может быть достигнуто увеличением Δt_d , т. е. применением бо-

лее нагревостойких диэлектриков, уменьшением k_c , что связано с уменьшением плюсового допуска по емкости за счет улучшения технологии изготовления конденсатора, а также уменьшения допусков по толщине бумажного листа и уменьшения $\operatorname{tg} \delta$, что является основным путем увеличения показателя мощности.

Рассмотрим более подробно связь между поверхностью теплорассеяния, перепадом температуры в конденсаторе и рассеиваемой мощностью. Для этого воспользуемся (6-49), описывающей теплообмен конденсатора с окружающей средой. Заменяя в формуле (6-49) $t_k = t_{\max} - P_{\text{уд}} R_{Tв}$ ($R_{Tв}$ — внутреннее тепловое сопротивление конденсатора), после преобразований получаем:

$$P_p = \frac{\alpha_T S}{1 + \alpha_T S R_{Tв}} (t_{\max} - t_0). \quad (7-72)$$

Полученная зависимость носит линейный характер относительно перепада температур. Тангенс угла наклона этой прямой характеризует теплорассеяние данной конструкции и определяется выражением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\alpha_T S}{1 + \alpha_T S R_{Tв}/V_a} = \frac{P_p}{t_{\max} - t_0} = \frac{P_p}{\Delta t}$$

Как видно из этого выражения, $\operatorname{tg} \varphi$ определяется поверхностью теплорассеяния S и возрастает с ее увеличением.

7-4. ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАЗМЕРОВ КОНДЕНСАТОРА НА ТЕМПЕРАТУРУ ДИЭЛЕКТРИКА

Вопрос об определении оптимального соотношения размеров конденсатора тесно связан с его тепловым расчетом, из которого можно получить критерии для однозначного определения оптимальной геометрии в каждом конкретном случае [Л. 7-2, 7-8—7-10]. Наибольшее распространение получила конструкция силового конденсатора в виде прямоугольного параллелепипеда. Для каждого конкретного типа конденсатора объем активных материалов (бумага, фольга, пропиточная масса активного объема) должен оставаться неизменным независимо от соотношения размеров (формы) конденсатора. Изменение массы конденсатора происходит только за счет изменения расхода материалов на внешнюю изоляцию паке-

та от корпуса и на корпус. Изменение соотношения размеров приводит к изменению размера охлаждающей поверхности конденсатора. Расход материалов на конструкцию будет наименьшим для конденсатора, имеющего форму куба. Из прочих прямоугольных параллелепипедов наименьшую массу будет иметь тот, основанием которого является квадрат, так как он имеет наименьший периметр из всех прямоугольников равновеликой площади.

При стационарном режиме работы конденсатора количество рассеиваемого тепла должно быть равно количеству выделяемого. Это требование может быть записано в виде

$$P_p = Q_k \operatorname{tg} \delta = \alpha_T S (t_k - t_0); \quad (7-73)$$

$$Q_k = \alpha_T S (t_k - t_0) / \operatorname{tg} \delta. \quad (7-74)$$

Заменяя $Q_k = Q_{уд} V_a$, в общем виде получаем:

$$Q_{уд} = \alpha_T S_0 (t_k - t_0) / \operatorname{tg} \delta. \quad (7-75)$$

Значение $Q_{уд}$ показывает степень использования диэлектрика в данной конструкции. Оно выражено через физические характеристики материалов, геометрическую характеристику конструкции S_0 и ее тепловую характеристику t_k и связано сложной зависимостью с геометрией конденсатора ($S_0 = S/V_a$).

Обычно при проектировании конденсатора наибольший интерес представляет изменение температуры наиболее нагретой точки при изменении его геометрии. Для частного случая бесконечно высокой анизотропной призмы прямоугольного сечения, окруженной слоем изотропной тепловой изоляции, показанной на рис. 7-3, где ввиду симметрии рассматривается только одна четверть сечения призмы, зависимость температуры t_d в центре сечения (точка O) от соотношения размеров, выражаемого через коэффициент $\beta = b/l$ ($\beta \leq 1$), приближенно может

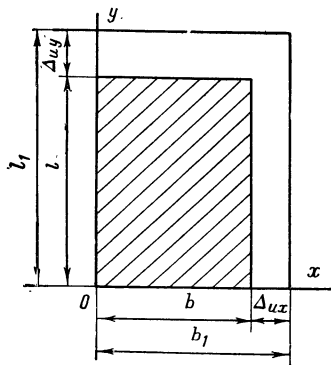


Рис. 7-3. Четверть сечения бесконечно высокой анизотропной призмы, окруженной слоем изотропной изоляции.

быть выражена следующей эмпирической формулой [Л. 7-2]:

$$t_{ц} = t_{ц0} (1 - e^{-0,9/(1-\beta)}), \quad (7-76)$$

где $t_{ц0}$ — температура в центре сечения при $\beta=1$.

Данные расчета затем проверяются и уточняются экспериментально на макетах конденсаторов.

7-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Тепловые параметры конденсатора, в том числе и граница его термической устойчивости, могут быть определены не только аналитически, но и графоаналитически на основе графического решения (7-68) и (7-70) [Л. 7-11].

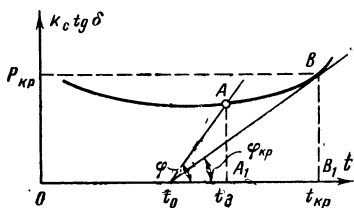


Рис. 7-4. Определение критической температуры диэлектрика.

С этой целью строят график зависимости потерь мощности от температуры по (7-68), что определяется величиной $k_c \operatorname{tg} \delta = f(t)$. Практически получается зависимость, близкая к температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика. На этом же графике в том же масштабе по (7-72) строят прямую теплорассеяния, пересекающую ось абсцисс в точке $t=t_0$ (рис. 7-4). Точка A пересечения графиков соответствует режиму работы конденсатора, при котором все выделяемое в нем тепло полностью рассеивается. Проекция A_1 точки A на ось абсцисс дает значение температуры в диэлектрике (OA_1). Отрезок t_0A_1 соответствует превышению температуры Δt диэлектрика над температурой окружающей среды, а $0t_0$ — окружающей температурой. Касательная, проведенная из точки t_0 к кривой тепловыделения (точка B) соответствует предельным потерям мощности, которые могут быть рассеяны данной конструкцией в окружающую среду при данной температуре. Эти потери мощности называются критическими $P_{кр}$, а соответствующее ей значение реактивной мощности — критической реактивной мощностью. Температура диэлектрика, соответствующая $P_{кр}$, называется критической температурой или температурой термической стабильности конденсатора, а угол наклона касательной $\varphi_{кр}$ — кри-

тическим углом рассеяния. Если угол наклона прямой теплорассеяния меньше критического, то графики тепловыделения и теплорассеяния не имеют общих точек, в этом случае конденсатор не будет иметь стабильного теплового состояния. Температура в диэлектрике такого конденсатора будет непрерывно возрастать вплоть до наступления теплового пробоя. Используя рис. 7-4, по (7-77) и (7-78) можно найти значения $\operatorname{tg} \varphi$ и показателя мощности M_p :

$$\operatorname{tg} \varphi = AA_1/t_0A_1 = P_K/\Delta t; \quad (7-77)$$

$$M_p = \Delta t/k_c \operatorname{tg} \delta = t_0A_1/AA_1 \equiv 1/\operatorname{tg} \varphi, \quad (7-78)$$

г. е. обратно пропорционален тангенсу угла наклона прямой теплорассеяния.

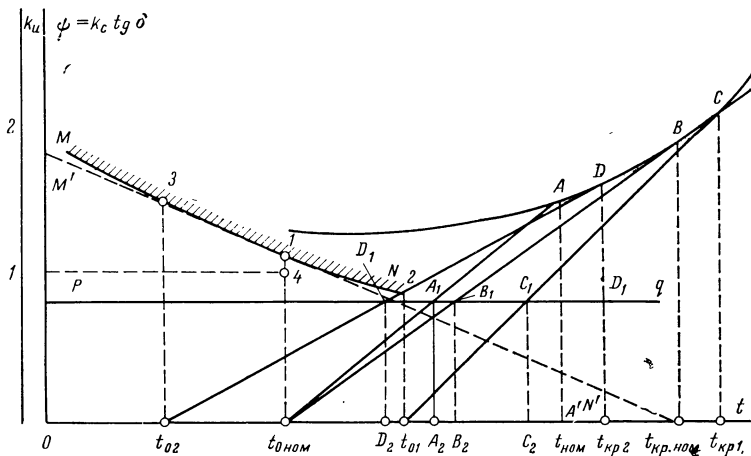


Рис. 7-5. Определение критических коэффициентов нагрузки.

В [Л. 7-12] предложен более универсальный метод определения тепловых параметров конденсатора, в основу которого также положено графическое решение уравнений тепловыделения и теплорассеяния. На рис. 7-5 приведена экспериментальная зависимость $\psi = k_c \operatorname{tg} \delta$ от температуры. Пусть точка $t_{0\text{ном}}$ соответствует номинальной окружающей температуре. Проводя из нее прямую теплорассеяния, получим точку A пересечения ее с кривой ψ . Проекция точки A' дает значение температуры $t_{\text{ном}}$ изоляции при номинальной реактивной мощности

$Q_{\text{ном}}(k_U=1)$. Используя (7-70), полагая в которой $k_U=1$, получаем выражение для $Q_{\text{ном}}$:

$$Q_{\text{ном}} = \Lambda \Delta t / k_C \operatorname{tg} \delta = \Lambda t_{\text{ном}} t_{\text{ном}} / A t_{\text{ном}}. \quad (7-79)$$

Для конденсатора с заданными номинальной мощностью и тепловыми характеристиками найдем допустимые значения коэффициента перегрузок k_U и окружающей температуры. С этой целью проведем ряд дополнительных построений. Параллельно оси абсцисс проведем вспомогательную прямую pq (рис. 7-5), которая пересечет линию $t_{\text{ном}} A$ в точке A_1 , из которой опустим перпендикуляр до пересечения с осью абсцисс в точке A_2 . После указанных построений, как видно из рис. 7-5, (7-79), можно записать в виде

$$Q_{\text{ном}} = \Lambda t_{\text{ном}} t_{\text{ном}} / A t_{\text{ном}} = t_{\text{ном}} A_2 \Lambda / A_1 A_2. \quad (7-80)$$

Поскольку Λ и отрезок $A_1 A_2$ постоянны, то отрезок $t_{\text{ном}} A_2$ в определенном масштабе представляет собой номинальную мощность. Разделив обе части (7-80) на $Q_{\text{ном}}$, получим в правой части уравнения выражение $t_{\text{ном}} A_2 / Q_{\text{ном}}$, представляющее собой коэффициент загрузки конденсатора k_U при номинальной мощности.

Для удобства последующего анализа описанное выше построение целесообразно выполнить так, чтобы значение k_U , а значит, и отрезок $t_{\text{ном}} A_2$ было удобно принять за единицу.

Для ряда окружающих температур $t_{\text{ном}}$, t_{01} , t_{02} проведем касательные к кривой ψ , которые будут иметь точки касания соответственно B , C , D . Эти касательные пересекут вспомогательную прямую pq в точках B_1 , C_1 , D_1 . Опустив из них перпендикуляры до пересечения с осью абсцисс, получим точки B_2 , C_2 , D_2 . Из точек $t_{\text{ном}}$, t_{01} , t_{02} как из центров радиусами $t_{\text{ном}} B_2$, $t_{01} C_2$ и $t_{02} D_2$ проводим дуги до пересечения их с линиями ординат, соответствующими абсциссам $t_{\text{ном}}$, t_{01} , t_{02} , и получим точки 1, 2, 3. Соединив эти точки линией MN , получим зависимость коэффициента загрузки конденсатора k_U , соответствующего температуре термической устойчивости, от окружающей температуры. Масштаб по оси ординат получим, проводя дугу из точки $t_{\text{ном}}$ радиусом $t_{\text{ном}} A_2$ до пересечения ее с ординатой в точке 4. Отрезок $t_{\text{ном}} 4$ принимается за единицу и является масштабом. Перпендикуляры, опущенные из точек B , C , D до пересечения с осью абсцисс в точках $t_{\text{кр.ном}}$, $t_{\text{кр}1}$,

$t_{кр2}$, дают значения критических температур $t_{0ном}$, $t_{кр.ном}$, t_{01} , $t_{кр1}$, t_{02} , $t_{кр2}$, соответствующих окружающим температурам $t_{0ном}$, t_{01} , t_{02} .

Определение коэффициентов загрузки конденсатора для заданных окружающих температур, при которых температура диэлектрика не превосходит заданного значения, показано на рис. 7-6, где построение проведено для температуры диэлектрика t_d . Вначале, как и при определении критических значений k_U на рис. 7-5, производится построение вспомогательной линии pq по номинальному режиму, что дает масштаб для последующих

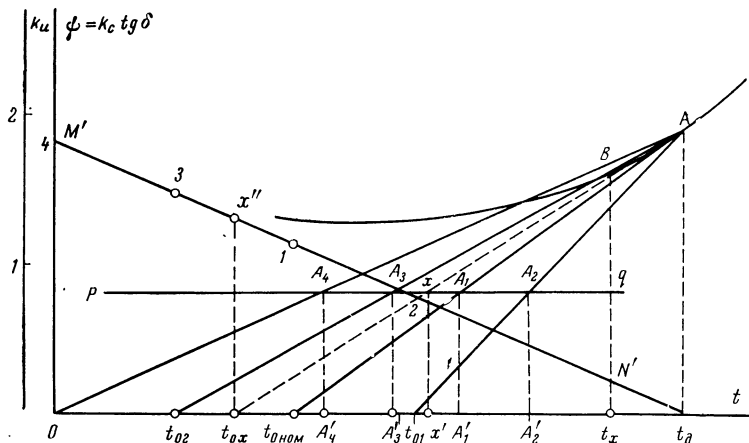


Рис. 7-6. Определение коэффициентов нагрузки, при которых температура диэлектрика не превосходит допустимую.

построений. Для заданной допустимой температуры t_d проводится ордината и находится точка A , из которой проводятся прямые в точки, соответствующие выбранным окружающим температурам $t_{0ном}$, t_{01} , t_{02} , 0 и т. п. Эти линии пересекут линию pq в точках A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , проекции которых на ось абсцисс дают точки A'_1 , A'_2 , A'_3 , A'_4 . Из точек $t_{0ном}$, t_{01} , t_{02} , 0 и т. п. как из центров радиусами $t_{0ном}A'_1$, $t_{01}A'_2$, $t_{02}A'_3$, $0A'_4$ и т. п. проводятся дуги до пересечения их с соответствующими линиями ординат в точках 1 , 2 , 3 , 4 . Соединяя эти точки и точку заданной температуры t_d , получаем прямую $M'N'$, выражающую зависимость коэффициентов загрузки конденсатора от окружающей температуры. График рис. 7-6 можно использовать также и для определения температуры

диэлектрика по заданной мощности Q_x (или коэффициенту загрузки конденсатора k_{Ux}) и заданной окружающей температуре. Для этого из точки, соответствующей заданной окружающей температуре t_{0x} , проводим ординату до пересечения с линией $M'N'$ в точке x'' . Из точки t_{0x} как из центра радиусом $t_{0x}x''$ проводим дугу до пересечения ее с осью абсцисс в точке x' , из которой восстанавливается перпендикуляр до пересечения его с линией pq в точке x . Через точки t_{0x} и x проводим прямую $t_{0x}B$ (на рис. 7-6 показана пунктиром). Проекция точки B на ось абсцисс дает искомую температуру t_x диэлектрика.

Важной характеристикой конденсатора и диэлектрика является показатель качества M_q , определяемый из соотношения

$$M_q = \Delta t_{кр} / (k_C \operatorname{tg} \delta)_{кр}, \quad (7-81)$$

где $\Delta t_{кр}$ — критический перепад температуры; $(k_C \operatorname{tg} \delta)_{кр}$ — критический коэффициент потерь.

Отношение

$$\frac{M_q}{M_p} = s = \frac{\Delta t_{кр}}{\Delta t_d} \frac{(k_C \operatorname{tg} \delta)_d}{(k_C \operatorname{tg} \delta)_{кр}} \quad (7-82)$$

характеризует запас по термической стабильности и называется показателем термического запаса. Значение s может быть больше, равно или меньше единицы, что определяется качеством диэлектрика и теплоотводящей способностью конструкции конденсатора. Чем больше s , тем больше тепловая устойчивость конденсатора, т. е. чем выше кривая MN (рис. 7-5) располагается над прямой $M'N'$ (показана пунктиром), тем больше s . При проектировании конденсатора нужно стремиться к тому, чтобы для заданных условий получить максимально возможное значение s .

Как видно из (7-82), значение s будет тем больше, чем больше отношение $\Delta t_{кр}$ к Δt_d . Это отношение будет тем больше, чем больше температурная зависимость $k_C \operatorname{tg} \delta$ будет приближаться к горизонтальной прямой. Кроме того, s тем больше, чем ближе к единице отношение $(k_C \operatorname{tg} \delta)_d / (k_C \operatorname{tg} \delta)_{кр}$. Это отношение также может быть увеличено «выпрямлением» температурной зависимости $k_C \operatorname{tg} \delta$. Однако одного только «выпрямления» указанной температурной зависимости недостаточно. Для повышения реактивной мощности в конденсаторе одно-

временно с этим необходимо снижать абсолютный уровень потерь в диэлектрике. Значение $s < 1$ имеет место при такой температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$, при которой предельная длительно допустимая температура диэлектрика выше температуры термической устойчивости конденсатора. В этом случае показатель мощности M_p уже не характеризует допустимую мощность и для ее оценки вводится действительный показатель мощности M_{pr} , определяемый из соотношения

$$M_{pr} = M_q / s_H, \quad (7-83)$$

где M_q — показатель качества, определяемый из (7-81); s_H — наименьшее допустимое значение показателя термического запаса, которым следует задаться.

7.6. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Тепловой режим является определяющим в работе электротермических конденсаторов. По этой причине самым тщательным образом должны быть исследованы все факторы, влияющие на него. Одним из определяющих факторов является конструкция конденсатора.

Особенность конструкции электротермических конденсаторов состоит в том, что практически все тепло отводится через обкладку

из фольги, соединенную с охлаждающей системой. Ввиду значительного тепловыделения для обкладок электротермических конденсаторов применяется фольга толщиной 16 мкм вместо фольги толщиной 7,5 мкм, применяемой в конденсаторах на частоту 50 Гц. На рис. 7-7 показаны расположение охлаждающей системы и схема отвода тепла из секции. Наиболее нагретой точкой изоляции является точка А. Тепловой поток на пути к охлаждающей воде проходит участки: а) по активному объему от точки А к точке 1, создавая на этом участке перепад температуры Δt_a ; б) по активной части фольги от точки 1 к точке 2 — Δt_1 ; в) по участку фольги между точками 2 и 3 — Δt_2 ; г) по припою — от места присоединения фольги до охлаждающей трубки — Δt_3 ; д) по переходному тепловому сопротивлению от стенки трубки к охлаждающей воде — $\Delta t_{ж}$. Перепад температуры в активном объеме на

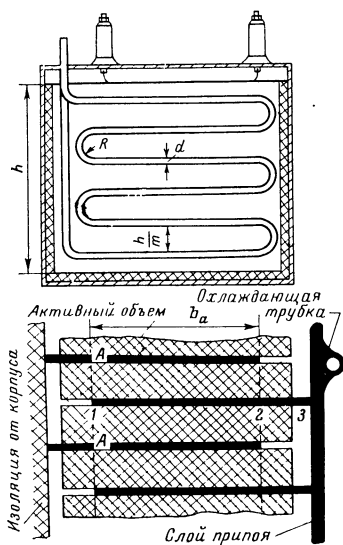


Рис. 7-7. Схема теплоотвода из электротермического конденсатора.

участке от точки A к точке 1 составляет $\{Л. 7-13\}$:

$$\Delta t_a = P_{уд} \left(\frac{nd_1}{k} \right)^2 \frac{1}{2\lambda_{\perp}}. \quad (7-84)$$

На каждый квадратный метр теплоотводящей фольги по всей ее длине b_a из диэлектрика поступает мощность $P_{уд1}$, выделяемая в столбе диэлектрика с основанием в 1 м^2 и высотой nd_1/k , т. е. $P_{уд1} = P_{уд} nd_1/k$. На 1 м^3 фольги приходится мощность $P'_{уд.ф}$, равная $P'_{уд.ф} = P_{уд} nd_1/kd_{ф}$. Собственные удельные потери мощности в фольге составляют: $P''_{уд.ф} = j^2 \rho_{ф}$ (j — плотность тока в фольге и $\rho_{ф}$ — удельное объемное сопротивление материала фольги). Суммарные потери, приходящиеся на 1 м^3 фольги, составляют $P_{уд.ф} = P'_{уд.ф} + j^2 \rho_{ф}$. Слагаемым $j^2 \rho_{ф}$ ввиду малости можно пренебречь. При определении перепада температуры Δt_1 на этом участке теплоотводящую фольгу можно рассматривать как систему с распределенными источниками тепла, в этом случае

$$\Delta t_1 = P_{уд.ф} b_a^2 / 2\lambda_{ф}. \quad (7-85)$$

Перепад Δt_2 на участке 2—3 фольги равен:

$$\Delta t_2 = P_{уд.ф} b_a \Delta_3 / \lambda_{ф}, \quad (7-86)$$

где Δ_3 — ширина фольги между точками 2 и 3.

Тепло, выделяемое в активном объеме изоляции и токоведущих частях, практически равномерно подводится обкладками ко всей поверхности пакета, на которую напавается охлаждающая система. Эта поверхность покрывается слоем припоя толщиной $\delta_{п}$, к каждому квадратному метру которой подводится мощность $P_{уд1} b_a$. Охлаждающие трубки, в которых происходит теплообмен с охлаждающей жидкостью, занимают не всю поверхность пакета. Положим, что прямолинейные участки охлаждающей трубки равномерно распределены по поверхности пакета высотой h и число их равно m . Тогда расстояние $\Delta_{п}$ между ними равно:

$$\Delta_{п} = h/m. \quad (7-87)$$

Перепад температуры Δt_3 в припое имеет место на половине расстояния между прямолинейными участками, так как к каждому из них подводится тепло только с половины расстояния между ними, и может быть вычислен по формуле

$$\Delta t_3 = \frac{P_{уд1} b_a}{\delta_{п} \lambda_{п}} \left(\frac{h}{2m} \right)^2, \quad (7-88)$$

где $\lambda_{п}$ — коэффициент теплопроводности слоя припоя.

Перепад температуры $\Delta t_{ж}$ на переходном сопротивлении от стенки трубки к охлаждающей воде составляет:

$$\Delta t_{ж} = P / \alpha S_{охл}, \quad (7-89)$$

где P — суммарные потери мощности в конденсаторе; $S_{охл}$ — размер поверхности, через которую происходит теплообмен с охлаждающей жидкостью; α — коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по (6-59). Общий перепад температуры Δt равен сумме перепадов по участкам:

$$\Delta t = t_{\max} - t_{0ж} = \Delta t_a + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_{ж}, \quad (7-90)$$

или, развертывая, получим:

$$t_{\text{макс}} = P_{\text{уд}} \left(\frac{nd_1}{k} \right)^2 \frac{1}{2\lambda_{\perp}} + P_{\text{уд.ф}} \left(\frac{b_a^2}{2\lambda_{\text{ф}}} + b_a \frac{\Delta_3}{\lambda_{\text{ф}}} \right) + P_{\text{уд}} \frac{nd_1}{k} \frac{b_a}{\delta_{\text{плп}}} \left(\frac{h}{2m} \right)^2 + \frac{P}{\alpha S_{\text{хл}}} + t_{\text{ож}}, \quad (7-91)$$

где $t_{\text{ож}}$ — температура охлаждающей воды.

Данные расчета проверяются экспериментально на реальных конденсаторах.

При эксплуатации электротермических конденсаторов самое серьезное внимание должно быть уделено уходу за конденсаторами и качеству охлаждающей воды. Современный электротермический конденсатор с водяным охлаждением имеет удельную реактивную мощность, в 4—5 раз превосходящую удельную реактивную мощность конденсатора с бумажно-пленочной изоляцией и с воздушным охлаждением. Поэтому состояние путей теплоотвода и, главным образом, чистота внутренней поверхности теплообменной трубки имеют решающее значение. При появлении на стенке трубки вследствие применения некачественной воды осадка толщиной в несколько микрон тепловой режим конденсатора может быть нарушен, следствием чего является быстрый выход конденсатора из строя.

7-7. МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛООТВОДА

Улучшение отвода тепла из силового конденсатора позволяет снизить температуру диэлектрика, что повышает срок его службы и надежность или допускает увеличение реактивной мощности в конструктивной единице. Улучшение внутренней теплопроводности, имеющей большое значение для конденсаторов с воздушным охлаждением, достигается рядом дополнительных конструктивных мероприятий, рассматриваемых ниже [Л. 7-14—7-18]

Теплоотвод в секциях со скрытой фольгой можно увеличить, если поверх секции намотать несколько витков алюминиевой фольги, создающей металлический экран, с помощью которого улучшается теплоотвод из внутренней части пакета. В зависимости от номинального напряжения конденсатора поверхность секций наматывается не один, а несколько экранов, изолированных друг от друга конденсаторной бумагой. Такое градирование позволяет уменьшить толщину изоляции пакета от корпуса, что также улучшает теплоотвод. Другой метод улучшения теплоотвода из внутренних витков секции со скрытой фольгой заключается в том, что в начале намотки ленты фольги сдвигаются в противоположные стороны таким образом, чтобы они

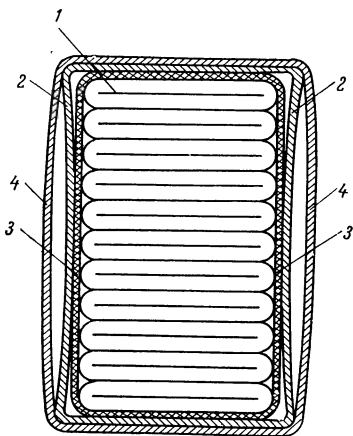


Рис. 7-8. Улучшение теплоотвода из центральной части пакета.

выступали за края бумаги. При дальнейшей намотке эти сдвиги постепенно уменьшаются и секция наматывается как секция со скрытой фольгой. Вместо сдвига лент фольги в начале намотки можно использовать более широкую фольгу, накладываемую на нормальную на этом участке и выступающую за края бумаги. После нескольких витков с широкой фольгой намотка продолжается с нормальной фольгой. Выступающая в начале намотки фольга улучшает теплоотвод из внутренних витков.

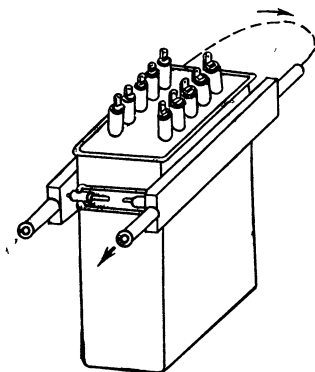


Рис. 7-9. Улучшение теплоотвода из верхней части конденсатора.

На рис 7-8 показана конструкция конденсатора с улучшенным теплоотводом из средней части пакета. Наиболее нагретой частью пакета 1 является середина его широкой стороны, отвод тепла от которой дополнительно затрудняется еще тем, что выпуклость широких боковых стенок корпуса 4 с увеличением температуры внутри конденсатора увеличивается и увеличивает путь прохождения тепла. Для повышения теплопроводности этого участка в корпус 4 вкладываются пластины 2 из теплопроводящего материала, например алюминия, которые своей средней частью плотно прилегают к средней части пакета 3 и выделяемое в средней части тепло отводят к узким боковым стенкам корпуса.

В качестве изоляции от корпуса может быть использована изоляция конденсаторного типа (т. е. изоляция, разделенная металлическими экранами), которая позволяет обеспечить хороший теплоотвод вследствие своей малой толщины и низкой интенсивности частичных разрядов за счет выравнивания поля. В конструкции, приведенной на рис. 7-9, улучшение теплоотвода достигается применением съемной приставки, охлаждаемой водой.

7-8. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ КОНДЕНСАТОРА

Нестационарный тепловой режим конденсатора (т. е. процессы нагрева и охлаждения) в ряде случаев (например, при перегрузках и т. п.) имеет важное значение. Выделяемое в конденсаторе тепло P_k частично расходуется на повышение внутренней температуры конденсатора (увеличение перегрева), частично рассеивается в окружающую среду. Обозначим превышение температуры изоляции конденсатора относительно окружающей среды через Δt . Для времени dt уравнение баланса тепла имеет вид:

$$P_k dt = c_T d(\Delta t) + a S \Delta t dt, \quad (7-92)$$

где c_T — теплоемкость всего конденсатора, рассчитываемая по (7-13).

Для стационарного теплового режима, когда $\Delta t = \Delta t_d$, все выделяемое тепло рассеивается в окружающую среду. При этом уравнение теплового баланса имеет вид:

$$P_K = \alpha S \Delta t_d. \quad (7-93)$$

Для определения зависимости перепада температуры в изоляции Δt_d от времени τ подставим (7-93) в (7-92) и получим:

$$\alpha S \Delta t_d d\tau = c_T d(\Delta t) + \alpha S \Delta t d\tau. \quad (7-94)$$

Преобразовав (7-94), будем иметь:

$$d(\Delta t_d - \Delta t) / (\Delta t_d - \Delta t) = (-\alpha S / c_T) d\tau. \quad (7-95)$$

Интегрирование (7-95) дает:

$$\Delta t_d - \Delta t = A e^{-\alpha S \tau / c_T}, \quad (7-96)$$

где $A = \Delta t_d$ — постоянная интегрирования, определяемая из условия: $\tau = 0$, $\Delta t = 0$. Учитывая, что $\Delta t = t - t_0$ и $\Delta t_d = t_d - t_0$, окончательно получаем значение температуры в функции времени при нестационарном режиме

$$t = t_0 + (t_d - t_0) (1 - e^{-\tau / \tau_0}), \quad (7-97)$$

где $\tau_0 = c_T / \alpha S$ имеет размерность времени и является постоянной времени нагрева конденсатора.

При охлаждении конденсатора тепловыделение в нем отсутствует, т. е. $P_K = 0$. В этом случае уравнение теплового баланса имеет вид:

$$c_T d(\Delta t) + \alpha S \Delta t d\tau = 0. \quad (7-98)$$

Разделив переменные Δt и τ , проинтегрировав и произведя подстановки, получим:

$$t = t_0 + (t_d - t_0) e^{-\tau / \tau_0}, \quad (7-99)$$

т. е. охлаждение конденсатора, как и его нагрев, происходит по экспоненциальному закону.

Экспериментальные данные показывают, что постоянная времени нагрева конденсатора зависит от его конструкции и лежит в пределах 2,5—4 ч.

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

8-1. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ СЕКЦИЙ

Импульсные конденсаторы в большинстве случаев работают в режиме колебательного или аperiodического разряда емкости самого конденсатора на индуктивность. При этом эквивалентная частота разряда конденсатора всегда представляет собой резонансную частоту колебаний емкости самого конденсатора и суммарной индуктивности (внутренней и внешней). Собственная индуктивность конденсатора в целом составляется из индуктивности его элементов:

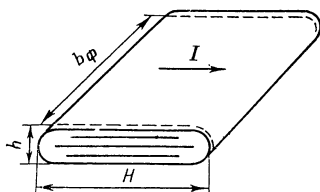


Рис. 8-1. Эскиз секции.

сечий, внутренних соединений (соединительных шин) и выводов. Индуктивность выводов в общем случае зависит от конструкции соединения конденсаторов в батарее. Ниже рассматривается расчет индуктивности элементов конденсатора [Л. 1-8, 8-1]. При расчете распределение тока по ширине обкладки можно считать равномерным.

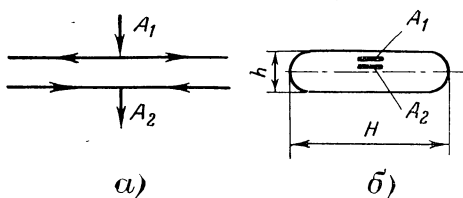


Рис. 8-2. Секция конденсатора с выводами, расположенными непосредственно друг над другом.

а — схема прохождения тока в секции; A_1 и A_2 — выводы разной полярности; б — способ закладки выводов друг над другом.

а) **Индуктивность обкладок секций** определяется их геометрическими размерами, количеством выводов, их размерами и расположением. Рассмотрим простейший случай, при котором секция (рис. 8-1) имеет только два вывода. При этом возможны два варианта их располо-

жения: 1) выводы расположены непосредственно друг против друга (рис. 8-2) и 2) выводы смещены относительно друг друга по длине обкладок (рис. 8-3). В первом случае секцию можно представить схемой замещения, приведенной на рис. 8-4,а. При оценке индуктивности обкладок в первом приближении их можно рассматривать как бесконечные полосы, обтекаемые током в раз-

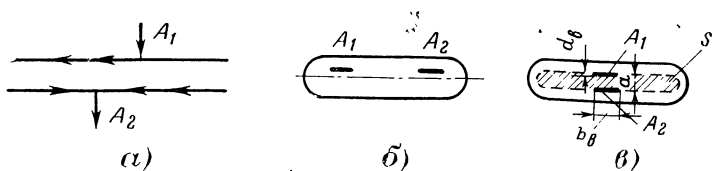


Рис. 8-3. Секция конденсатора с выводами, смещенными относительно друг друга по длине обкладок.

а — схема прохождения тока в секции; б — смещение выводов в пределах ширины секции; в — смещение выводов на 0,5 оборота или число, кратное 0,5 оборота.

ных направлениях [Л. 8-2]. При равномерном распределении тока по сечениям обкладок их индуктивность может быть оценена по формуле

$$L_1 = \frac{\mu_0 l_3}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} (3\beta - \delta) - \frac{25}{12} \beta^2 - \frac{1}{12} \beta^4 - \frac{1}{12} \beta^2 \delta^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{12\delta^2} (\zeta^4 \ln \zeta - 2\beta^4 \ln \beta + \gamma^4 \ln \gamma^4 - 2\delta^4 \ln \delta^4) \right], \quad (8-1)$$

где $\zeta = (2d_\phi + d_c)/b_\phi$; $\beta = (d_\phi + d_c)/b_\phi$; $\gamma = d_c/b_\phi$; $\delta = d_\phi/b_\phi$; d_c — расчетная толщина диэлектрика секции; b_ϕ — ширина обкладки (фольги); l_3 — эквивалентная длина обкладок; d_ϕ — толщина обкладки.

При $b_\phi \gg d_c$ и $b_\phi \gg d_\phi$, что имеет место в реальных секциях, (8-1) принимает вид:

$$L_1 = \frac{\mu_0 l_3}{3} \left(\frac{2d_\phi + 3d_c}{b_\phi} \right). \quad (8-2)$$

В большинстве случаев $d_c \gg d_\phi$ и тогда

$$L_1 = \mu_0 d_c l_3 / b_\phi. \quad (8-3)$$

При определении эквивалентной индуктивности обкладок необходимо учитывать, что ток линейно уменьшается вдоль обкладок. Эквивалентная длина обкладок может быть определена, если в качестве критерия экви-

валентности двух систем принять равенство энергий, запасаемых в индуктивностях.

Энергия W_1 , запасаемая в индуктивности обкладок секции при расположении выводов на одном конце и разряде конденсатора на индуктивность, существенно превышающую индуктивность конденсатора, с учетом линейного распределения тока вдоль обкладок (см. § 6-2) равна:

$$W_1 = \int_0^{l_\Phi} \frac{1}{2} L_{уд.об} I^2 \left(\frac{x}{l_\Phi} \right)^2 dx = L_{уд.об} \frac{I^2 l_\Phi}{6}, \quad (8-4)$$

где $L_{уд.об} = \mu_0 d_c / b_\Phi$ — индуктивность обкладок на единицу длины; l_Φ — длина фольги секции.

Примем эквивалентную индуктивность обкладок

$$L_1 = L_{уд.об} l_3. \quad (8-5)$$

Энергия, запасаемая в эквивалентной индуктивности L_1 , также равна W_1 , т. е.

$$W_1 = \frac{I^2 L_1}{2} = L_{уд.об} \frac{I^2 l_3}{2}. \quad (8-6)$$

Из (8-4) и (8-6) для эквивалентной длины секции l_3 имеем:

$$l_3 = l_\Phi / 3. \quad (8-7)$$

При разряде конденсатора на индуктивность, существенно меньшую его собственной, эквивалентная длина обкладки может быть определена по первой гармонике и равна:

$$l_3 = 4l_\Phi / \pi^2 \approx 0,4l_\Phi. \quad (8-8)$$

Если один вывод смещен относительно другого по длине фольги, то в этом случае упрощенная эквивалентная схема замещения секции имеет вид, изображенный на рис. 8-4,б. Индуктивность L_1 (для бифилярно расположенных частей обкладок) в первом приближении может быть оценена по (8-2). Индуктивность участка секции между двумя смещенными выводами зависит от взаимного расположения выводов. Если выводы сдвинуты по длине обкладок фольги в пределах ширины секции (рис. 8-3,б), то индуктивность L_2 участка фольги, на котором токи в обеих обкладках направлены согласно (с учетом взаимоиндукции между обкладками) в случае

приблизительного равенства токов в соседних обкладках на этом участке, может быть определена по формуле из [Л. 8-2]

$$L_2 = \frac{\mu_0 l_{12}}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_{12}}{b_\Phi} + \frac{1}{2} \right), \quad (8-9)$$

где l_{12} — длина участка обкладки между выводами.

Если выводы сдвинуты по длине фольги на 0,5 оборота (рис. 8-3, в), то L_2 определяется геометрическими размерами петли, образованной фольгой при ее намотке на пол оборота, т. е. зависит от толщины фольги d_Φ , ее

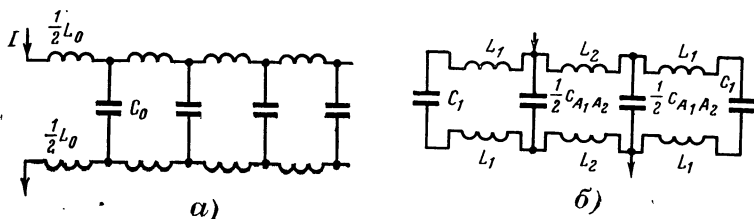


Рис. 8-4. Схемы замещения секции конденсатора с выводами, расположенными непосредственно друг над другом (а), и упрощенная эквивалентная схема замещения секции с выводами, смещенными относительно друг друга по длине обкладок (б).

L_0 — индуктивность на единицу длины обкладок; C_0 — емкость на единицу длины обкладок; L_1 — индуктивность бифилярно расположенных частей обкладок; L_2 — индуктивность участка обкладок между смещенными выводами A_1 и A_2 ; C_1 — емкость бифилярно расположенных частей обкладок; $C_{A_1 A_2}$ — емкость участка $A_1 A_2$.

ширины b_Φ , длины петли l_2 и толщины всех предшествующих слоев (расстояния а). При этом индуктивность L_2 определится по формуле

$$L_2 = \frac{\mu_0 l_2}{3} \left(\frac{2d_\Phi + 3a}{b_\Phi} \right) \approx \frac{\mu_0 l_2 a}{b_\Phi}. \quad (8-10)$$

Если выводы сдвинуты на один оборот по длине обкладок, индуктивность этого витка фольги, являющаяся искомой индуктивностью L_2 , определится из соотношения

$$L_2 = \mu_0 S / b_\Phi, \quad (8-11)$$

где S — площадь поперечного сечения витка фольги.

При смещении выводов на несколько оборотов индуктивность определяется индуктивностью нескольких витков фольги, расположенных между выводами. Для расчета L_2 также можно воспользоваться (8-11), но приме-

нительно к нескольким виткам фольги с учетом их коэффициентов взаимоиндукции

$$L_2 = \frac{\mu_0}{b_\Phi} [n^2 S_0 + (n-1)^2 S_1 + (n-2)^2 S_2 + \dots + S_{n-1}], \quad (8-12)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения первого витка; $S_1, S_2, \dots, S_{n-1}$ — разность между площадями сечения первого и второго витков, второго и третьего, $(n-1)$ -го и n -го витков фольги.

Если один из выводов расположен в начале намотки, то большей частью можно приблизительно считать, что $S_0 \approx S_1 \approx S_2 \approx \dots \approx S_{n-1}$. В этом случае (8-12) принимает вид:

$$L_2 = \sum_{j=0}^{n-1} (n-j)^2 \frac{\mu_0 S_j}{b_\Phi} = \frac{\mu_0 S_0}{b_\Phi} \sum_{j=0}^{n-1} (n-j)^2. \quad (8-13)$$

Если один вывод расположен в любой точке по длине обкладки, а второй смещен относительно него по другой обкладке на n оборотов, то $S_0 \neq S_1 \approx S_2 \approx \dots \approx S_{n-1}$ и (8-12) может быть представлена в следующем виде:

$$L_2 = n^2 \frac{\mu_0 S_0}{b_\Phi} + \frac{\mu_0 S_1}{b_\Phi} \sum_{j=0}^{n-1} (n-j)^2, \quad (8-14)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения внутреннего витка обкладки, на котором расположен один из выводов; S_1 — разность между площадями сечения соседних витков, которые могут быть приняты приблизительно одинаковыми.

Таким образом, наименьшая индуктивность обкладок имеет место в том случае, когда выводы расположены непосредственно друг против друга.

б) Индуктивность выводов секций. В конденсаторных секциях рулонного типа выводы выполняются в основном в виде медных шин и располагаются для уменьшения индуктивности с одного торца. Индуктивность выводов секции при смещении их в пределах ширины секции (рис. 8-3, б) может быть определена по формуле из [Л. 8-8]:

$$L_3 = \frac{\mu_0 l_B}{\pi} \left(\ln \frac{D}{b_B} + \frac{3}{2} \right). \quad (8-15)$$

где $b_{\text{в}}$ — ширина вывода; $l_{\text{в}}$ — длина вывода; D — расстояние между осями выводов.

При смещении выводов на 0,5 оборота или на длину фольги, кратную 0,5 оборота, и расположении их друг против друга индуктивность выводов рассчитывается по формуле, аналогичной (8-2):

$$L_3 = \frac{\mu_0 l_{\text{в}}}{3} \left(\frac{2d_{\text{в}} + 3a}{b_{\text{в}}} \right), \quad (8-16)$$

где a — расстояние между выводами; $d_{\text{в}}$ — толщина выводов (рис. 8-3, в).

Формула справедлива для случая равномерного распределения тока по сечению выводов, что имеет место при частотах до $(1-1,5) 10^6$ Гц при толщине выводов около 0,05 мм. При более высоких частотах в шинах происходит вытеснение тока к их внутренней поверхности, и тогда справедлива формула, аналогичная (8-3).

в) **Индуктивность секций.** При расчете индуктивности секции в целом обычно можно пренебречь емкостью секции на участке между смещенными выводами, так как она значительно меньше емкости всей секции. При этом в случае расположения выводов у середины обкладок индуктивности L_1 обеих половин обкладок складываются параллельно и суммарная индуктивность секции будет определяться суммой индуктивностей

$$L_c = \frac{1}{2} L_1 + L_2 + L_3 = \frac{\mu_0 d_c l_{\Phi}}{12b_{\Phi}} + L_2 + L_3. \quad (8-17)$$

В случае, если выводы не смещены и расположены непосредственно один против другого посередине обкладок, то

$$L_c = \frac{1}{2} L_1 + L_3 = \frac{\mu_0 d_c l_{\Phi}}{12b_{\Phi}} + L_3. \quad (8-18)$$

Однако такое расположение выводов конструктивно не всегда целесообразно, так как затрудняет параллельное соединение секции.

Для оценки влияния на индуктивность секции места расположения выводов их относительного смещения и их количества рассмотрим следующие варианты конструктивного выполнения секции [Л. 8-3]: 1) выводы располагаются непосредственно друг под другом и место их расположения изменяется по длине обкладок; 2) выводы смещены друг относительно друга на пол оборота по

длине обкладок и место их расположения изменяется по длине обкладок; 3) один вывод смещается относительно другого по длине обкладки на число оборотов, кратное 0,5 оборота; 4) выводы расположены посередине обкладок и смещаются относительно друг друга в пределах ширины секции; 5) секция имеет несколько выводов на каждой обкладке, равномерно расположенных по ее длине.

На рис. 8-5 приведены соответствующие зависимости индуктивности секции от места расположения выводов

по длине обкладок. Все данные приведены для секции емкостью 1,0 мкФ с толщиной диэлектрика 80 мкм при ширине фольги 280 мм. Из рис. 8-5, а следует, что при отсутствии смещения выводов друг относительно друга

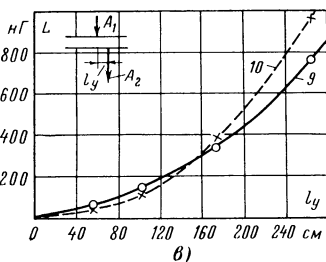
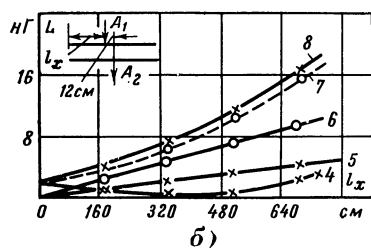
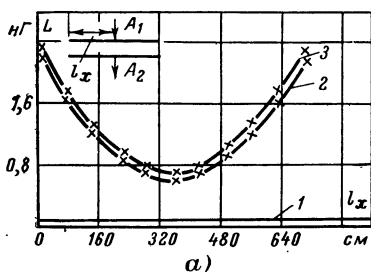


Рис. 8-5. Зависимость индуктивности секции от места расположения выводов по длине обкладок ($C_1=1,0$ мкФ, $d_c=8 \times 10$ мкм).

а — выводы A_1 и A_2 лежат непосредственно друг над другом. Начало отсчета соответствует началу намотки секции; б — выводы сдвинуты относительно друг друга на 0,5 оборота по длине обкладок; в — выводы смещены по длине обкладок, вывод A_1 заложен посередине обкладки секции; 1 — индуктивность выводов секции; 2 — индуктивность обкладок секции; 3 — суммарная индуктивность секции; 4 — индуктивность бифилярно расположенных концов обкладок секции (расчет); 5 — индуктивность части обкладок между выводами (расчет); 6 — индуктивность выводов (расчет); 7 — суммарная индуктивность секции (расчет); 8 — суммарная индуктивность секции (опыт); 9 — опыт; 10 — расчет.

индуктивность секции в зависимости от места расположения выводов на обкладках изменяется в ограниченных пределах, а индуктивность остается незначительной (менее 2,5 нГ) при любом месте расположения выводов. Во втором случае (рис. 8-5,б), когда выводы сдвинуты

относительно друг друга на 0,5 оборота, индуктивность секции существенно возрастает при увеличении расстояния от начала намотки, что объясняется значительным увеличением индуктивностей L_2 и L_3 вследствие увеличения размера a или площади S за счет толщины предшествующих слоев при намотке. При расположении выводов в начале намотки секции индуктивность не превышает 2,5 нГ, при расположении выводов в конце секции — возрастает до 16 нГ.

В третьем случае, когда выводы сдвинуты относительно друг друга на полоборота или число, кратное 0,5 оборота по длине обкладки (рис. 8-5,в), индуктивность секции резко возрастает за счет индуктивности средних частей обкладок, расположенных между выводами и обтекаемых током в одном направлении. Так, например, при увеличении смещения между выводами от 0,5 оборота (11,6 см) до 11,5 оборота (267 см) индуктивность секции возрастает от 2 до 760 нГ.

В четвертом случае, когда выводы смещаются относительно друг друга в пределах ширины секции, они делаются значительно более узкими. Минимальное расстояние между ними в этом случае выбирается из условия отсутствия перекрытия между выводами различной полярности, максимальное — из возможной ширины секции. Индуктивность секции в этом случае в основном определяется индуктивностью выводов и резко возрастает при увеличении расстояния между выводами: от 0,8 нГ (выводы расположены непосредственно друг под другом) до 15 нГ.

Уменьшение индуктивности секции может быть достигнуто за счет размещения нескольких пар выводов, равномерно расположенных по длине фольги [Л. 8-4]. Если число пар выводов равно n_b и ток между выводами одной полярности распределяется равномерно, то индуктивность обкладок уменьшается обратно пропорционально n_b^2 , а индуктивность системы выводов — обратно пропорционально n_b . Наиболее распространенным конструктивным выполнением секции в этом случае является смещение выводов одной полярности на полоборота по длине обкладок относительно выводов другой полярности, так как при этом обеспечивается надежная изоляция между ними (рис. 8-6,а). Однако в этом случае достаточно затруднительно обеспечить равномерное распределение тока между выводами одной полярности. Из

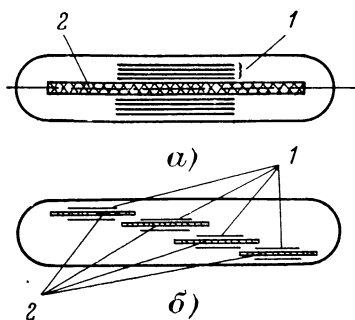


Рис. 8-6. Варианты размещения нескольких выводов в секции, равномерно расположенных по длине обкладки.

a — в каждой паре выводов один смещен относительно другого на 0,5 оборота; *б* — в каждой паре выводов один расположен непосредственно над другим; 1 — выводы одной полярности; 2 — изоляция между выводами.

рассмотрения кривой 6 (рис. 8-5,б) следует, что индуктивность различных пар выводов существенно различна и

возрастает от 0,25 нГ при их расположении в начале обкладок до 10 нГ при их расположении в конце обкладок. Так как индуктивность обкладок на участках между выводами при достаточно широкой фольге чаще всего значительно меньше индуктивности соответствующей пары выводов, смещенной относительно начала секции, то все дополнительные выводы будут шунтированы основными обкладками и практически не примут участия в токораспределении. При этом практически весь ток вытесняется на первую пару выводов, расположенную в начале намотки и обладающую наименьшей индуктивностью.

Следовательно, в секциях с широкой фольгой ($b_{\text{ф}} > 200$ мм) и большим количеством выводов по сравнению с конструкцией, имеющей два вывода, расположенных в начале обкладок, ожидаемого уменьшения индуктивности почти не будет. Этот способ целесообразен главным образом для секций с малой шириной фольги ($b_{\text{ф}} < 100$ мм). В этом случае для увеличения количества выводов целесообразно применение фольги специальной конфигурации, имеющей выступы на боковых краях (рис. 8-7). При намотке выступы каждой из обкладок располагаются по разные стороны от изоляционной прокладки и соединяются вместе [Л. 8-5, 8-6].

Уменьшения индуктивности секции с широкой фольгой можно добиться следующими способами: а) делением секции на несколько секций меньшей емкости, в каждой из которых одна пара выводов в пакете секций смещается относительно другой согласно рис. 8-8,а; б) увеличением числа пар выводов в секции, равномерно распределенных по длине фольги и смещенных по торцу распределенных по длине фольги и смещенных по торцу намотанной секции одна относительно другой (рис.

8-6,б). В этом случае обеспечивается равномерное распределение тока между выводами одной полярности и формула (8-17) для индуктивности секции при числе пар выводов, равном n_B , приобретает вид:

$$L_c = \mu_0 d_c l_\Phi / 12 b_\Phi n_B^2 + L_3 / n_B.$$

Необходимо учитывать, что в рулонной секции каждый виток имеет емкость не только между своими об-

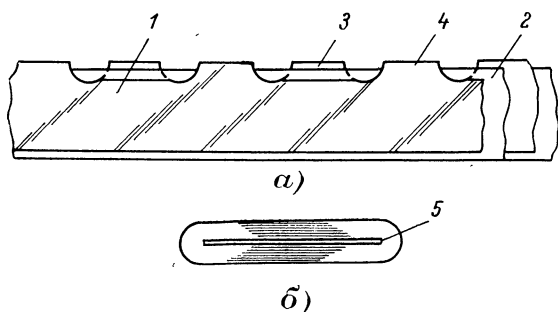


Рис. 8-7. Эскиз секции малоиндуктивного конденсатора со специальной формой обкладок.

а — эскиз формы обкладок; *б* — расположение выступов обкладок на торце секции; 1 — обкладка; 2 — диэлектрик; 3 — выступ на краю обкладки; 4 — утолщения; 5 — изоляционная прокладка.

кладками, но и между соседними обкладками смежных витков противоположной полярности. Поэтому при наличии в секции двух выводов, расположенных друг под другом (рис. 8-2,б), схема рис. 8-4,а справедлива только для половины емкости секции, образованной двумя ненамотанными обкладками. Для емкости, образованной смежными витками, справедлива эквивалентная схема рис. 8-4,б, так как для этой емкости выводы смещены на один оборот по длине обкладок (рис. 8-9,а). Учитывая это обстоятельство, для уменьшения индуктивности секции необходимо: либо иметь три вывода, из которых один расположен на одной обкладке, а другие — на двух соседних витках противоположной обкладки с двух сторон относительно первого в соответствии с рис. 8-9,б [Л. 8-7]; либо при наличии нескольких пар выводов, расположенных по рис. 8-6,б, чередовать их так, чтобы они соответствовали рис. 8-2,б поочередно как для емко-

сти, образованной ненамотанными обкладками секций, так и для емкости, образованной смежными витками.

Для обеспечения минимальной индуктивности пакета, состоящего из n параллельно соединенных групп секций

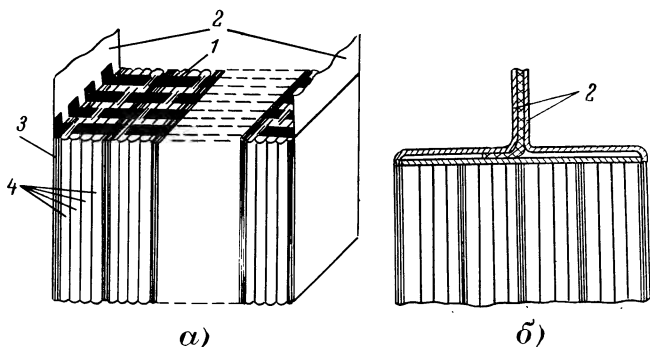


Рис. 8-8. Схема малоиндуктивного соединения секций в пакете конденсатора.

a — схема соединений секций; b — схема расположения токоведущих шин; 1 — соединение выводов секций; 2 — токоведущие шины из меди, при сборке отгибаются к пакету; 3 — изоляция из кабельной бумаги между группами секций; 4 — группа секций, состоящая из четырех секций, заменяющих секцию большей емкости.

при последовательном соединении секций в каждой группе, секции со смещенными выводами соединяются последовательно через $(n-1)$ секцию (рис. 8-8, a). На рис. 8-10 приведен пример более простого соединения секций,

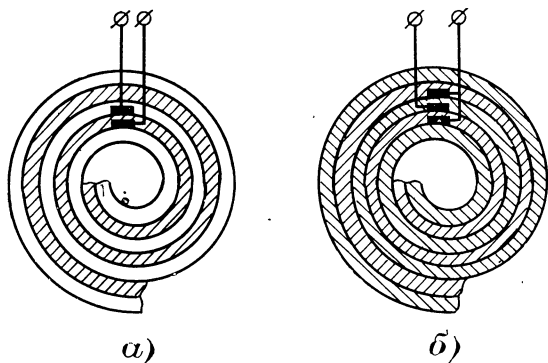


Рис. 8-9. Схема намотки секций конденсатора.

a — при наличии двух выводов, расположенных друг над другом; b — при наличии трех выводов, расположенных друг над другом. Заштрихованная часть — емкость, для которой выводы расположены непосредственно друг над другом.

в котором, однако, возникает большая индуктивность контура за счет относительного смещения выводов по ширине секции.

Следует учитывать, что при наличии в пакете последовательно соединенных секций применение так называемой «безындукционной» намотки с выступающей по торцам секции фольгой (рис. 1-5,б) приводит к значительной индуктивности всего пакета. Это объясняется тем, что в этом случае ток идет по зигзагообразному пути, причем индуктивность каждого зигзага определяется эквивалентной индуктивностью петли из двух шин сечением, равным поперечному сечению секции, с противоположным направлением токов при весьма малом расстоянии между шинами, и взаимной индуктивностью соседних петель. Так как ток в рассматриваемом случае следует считать равномерно распределенным по сечению шины, то индуктивность такой пары L_6 в первом приближении определится их длиной (шириной фольги секции b_ϕ) и средним геометрическим расстоянием площадей поперечных сечений секции g_{11} и соседних секций g_{12} [Л. 8-8]

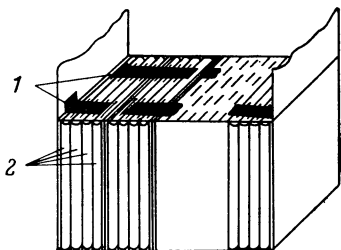


Рис. 8-10. Схема соединений секций в пакете, приводящая к большой индуктивности конденсатора.

1 — межсекционные перемычки; 2 — группа секций, состоящая из четырех параллельно соединенных секций.

$$L_6 = \frac{\mu_0}{\pi} b_\phi \ln \frac{g_{12}}{g_{11}}.$$

При обычных размерах секции: $b_\phi = 28$ см, толщине секции 1,0 см, ширине секции 10 см — имеем $L_6 = 50$ нГ, что является недопустимо большим. Как было показано выше, в секциях с выводами, расположенными с одного торца, можно обеспечить индуктивность на 2 порядка меньше.

8-2. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ И ВЫВОДОВ КОНДЕНСАТОРА

В ряде случаев при параллельном соединении секций каждая секция соединяется с общей шиной плавким предохранителем, сгорающим при пробое секции. Индуктивность предохранителя $L_{пр}$ зависит от его размеров и расположения относительно токоведущих

частей конденсатора. Для случая, когда предохранитель расположен параллельно направлению тока в обкладках секций, индуктивность его можно определить как для системы провод — плоскость [Л. 8-8]

$$L_{\text{пр}} = \frac{\mu_0 l_{\text{пр}}}{2\pi} \ln \frac{2h}{r_{\text{пр}}}, \quad (8-19)$$

где $l_{\text{пр}}$ — длина предохранителя; h — расстояние между предохранителем и торцевой частью обкладки секций; $r_{\text{пр}}$ — радиус провода предохранителя.

Формула (8-19) справедлива при $r_{\text{пр}} \ll h$.

Для уменьшения индуктивности конденсатора в ряде случаев вывод (или выводы каждой из полярностей) выполняется и нескольких стержней (болтов), соединенных параллельно, или в виде плоских шин. При этом выводы различных полярностей разделяются изолирующей перегородкой (рис. 1-8,а). Иногда выводы выполняются в виде двух коаксиальных цилиндров, также разделенных изолирующей перегородкой (рис. 1-8,б).

Рассмотрим случай, когда выводы конденсатора одной полярности выполняются в виде ряда стержней (болтов), а другой полярности — в виде шины. Если расстояние между соседними стержнями одинаковой полярности $a_{\text{в}}$ значительно больше расстояния $d_{\text{в}}$ от стержня до шины противоположной полярности, то, пренебрегая взаимоиндукцией между соседними стержнями одинаковой полярности, индуктивность выводов $L_{\text{в}}$ можно определить как для системы провод — плоскость:

$$L_{\text{в}} = \frac{\mu_0 l_{\text{в}}}{N2\pi} \ln \frac{2d_{\text{в}}}{r_{\text{в}}}, \quad (8-20)$$

где $l_{\text{в}}$ — длина токоведущей части стержня; $r_{\text{в}}$ — радиус стержня; $d_{\text{в}}$ — расстояние между осью стержня и плоскостью шины; N — число стержней одной полярности.

Когда выводы обеих полярностей выполняются в виде стержней (болтов), причем расстояния между стержнями одной полярности много больше расстояния между стержнями противоположных полярностей, то, пренебрегая взаимоиндукцией между стержнями соседних пар одинаковой полярности, индуктивность выводов можно определить как для системы провод — провод:

$$L_{\text{в}} = \frac{\mu_0 l_{\text{в}}}{N\pi} \ln \frac{d_{\text{в}}}{r_{\text{в}}}, \quad (8-21)$$

где $d_{\text{в}}$ — ближайшее расстояние между стержнями противоположных полярностей.

В случае, когда расстояние между стержнями одинаковой полярности $a_{\text{в}}$ равно или меньше расстояния $d_{\text{в}}$ от стержня до шины противоположной полярности или расстояния между ближайшими стержнями противоположной полярности, необходимо учитывать взаимную индукцию между стержнями с одинаковой и противоположной полярностью. Если при этом выводы расположены в ряд, то индуктивность их согласно [Л. 1-8] можно рассчитать по формуле

$$L_{\text{в}} = \mu_0 l_{\text{в}} \left(\frac{d_{\text{в}}}{b_{\text{ш}}} + \frac{a_{\text{в}}}{2\pi b_{\text{ш}}} \ln \frac{a_{\text{в}}}{2\pi r_{\text{в}}} \right) = \mu_0 l_{\text{в}} \left(\frac{d_{\text{в}}}{b_{\text{ш}}} + \frac{1}{2\pi N} \ln \frac{a_{\text{в}}}{2\pi r_{\text{в}}} \right), \quad (8-22)$$

где $b_{\text{ш}}$ — ширина шины или ширина участка, на котором расположены стержни одинаковой полярности (в последнем случае $b_{\text{ш}} = a_{\text{в}}N$).

В случае, когда стержни (выводы) одной полярности расположены по окружности с радиусом R_1 , а выводы противоположной полярности — по окружности с радиусом R_2 ($R_1 > R_2$, окружности концентрические) или вывод противоположной полярности выполнен в виде цилиндра с радиусом R_2 , индуктивность выводов может быть вычислена по формуле

$$L_{\text{в}} = \frac{\mu_0 I_{\text{в}}}{2\pi} \left(\ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{2\pi N} \ln \frac{R_1}{Nr_{\text{в}}} \right). \quad (8-23)$$

В (8-22) и (8-23) первый член соответствует индуктивности системы с непрерывным распределением тока либо по плоскости, эквивалентной плоскости расположения стержней одинаковой полярности (8-22), либо по окружности радиусом R_1 (8-23), второй член учитывает дискретный характер протекания тока.

8-3. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ ШИН, СОЕДИНЯЮЩИХ СЕКЦИИ КОНДЕНСАТОРА С ВЫВОДАМИ, И ИНДУКТИВНОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Способ соединения пакета секций, главных шин и выводов конденсатора и другие конструктивные особенности в большой мере сказываются на значении его индуктивности. Ниже рассмотрено несколько возможных вариантов конструкции конденсатора.

Первый случай наиболее характерен для большого количества последовательно соединенных секций или групп секций в пакете, при котором крайние секции соединяются с выводами конденсатора плоскими шинами (рис. 8-8,б). В этом случае индуктивность шин пропорциональна площади сечения $S_{\text{ш}}$, заключенного между шинами и пакетом секций, и обратно пропорциональна ширине шины $b_{\text{ш}}$:

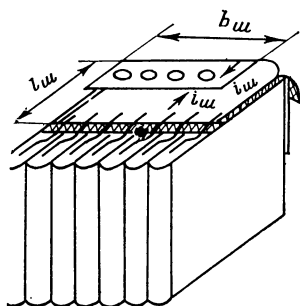
$$L_{\text{ш}} = \mu_0 S_{\text{ш}} / b_{\text{ш}}. \quad (8-24)$$

Второй случай (рис. 8-11,а) характерен для большого количества параллельно соединенных секций, присоединяемых к шинам на одинаковом расстоянии (по шине) относительно выводов конденсатора.

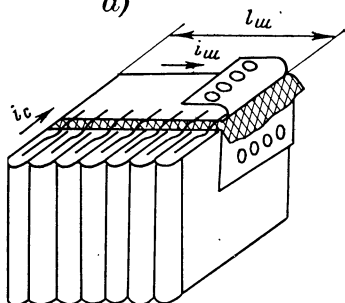
В этом случае индуктивность шин определяется по формуле, аналогичной (8-3):

$$L_{\text{ш}} = \mu_0 d_{\text{ш}} l_{\text{ш}} / b_{\text{ш}}, \quad (8-25)$$

где $l_{\text{ш}}$ — длина шин; $d_{\text{ш}}$ — расстояние между шинами, определяемое требуемой толщиной изоляции.



а)



б)

Рис. 8-11. Эскизы (а и б) конденсатора при параллельном соединении секций.

шины, соединяющей их с выводами конденсатора (рис. 8-11,б). В этом случае ток, протекающий по шине, изменяется по ее длине и конденсатор может быть заменен эквивалентной схемой рис. 8-12. При равномерном расположении секций вдоль шины можно принять:

$$\left. \begin{aligned} L'_1 &= L'_2 = \dots = L'_n = L'_ш; \\ L_{c1} &= L_{c2} = \dots = L_{cn} = L_c; \\ C_1 &= C_2 = \dots = C_n = C_c. \end{aligned} \right\} \quad (8-27)$$

Рассмотрим разряд конденсатора на малоиндуктивную нагрузку L_H .

В этом случае, как показано в [Л. 1-8], ток в нагрузке для схемы рис. 8-12 равен:

$$i(t) = \sum_{j=1}^n \frac{U_0 C_c \operatorname{tg}^2 n \alpha_j}{\beta \left(1 + 2n\beta \frac{1 + \operatorname{tg}^2 n \alpha_j}{\beta^2 + \operatorname{tg}^2 n \alpha_j} \right)} \times$$

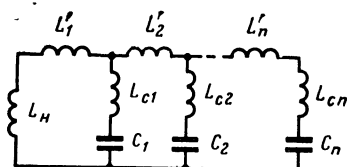


Рис. 8-12. Схема замещения для расчета индуктивности конденсатора при параллельном соединении секций.

Суммарная индуктивность конденсатора L_K для обоих вариантов складывается из индуктивности пакета секций L_{Π} , главных шин $L_{\text{ш}}$ и выводов $L_{\text{в}}$:

$$L_K = L_{\Pi} + L_{\text{ш}} + L_{\text{в}}. \quad (8-26)$$

В обоих вариантах ток по длине шины остается неизменным.

В третьем случае конденсатор состоит из n параллельно соединенных секций, причем секции присоединены равномерно вдоль длины

$$\times \frac{\sin \frac{t}{\sqrt{C_c \left[L_c + \frac{L'_{ш}}{4\beta^2} (\beta^2 + \operatorname{tg}^2 n\alpha_j) \right]}}}{\sqrt{C_c \left[L_c + \frac{L'_{ш}}{4\beta^2} (\beta^2 + \operatorname{tg}^2 n\alpha_j) \right]}}, \quad (8-28)$$

где U_0 — зарядное напряжение конденсатора;

$$\beta = L'_{ш}/2L_{н}, \quad (8-29)$$

α_j — корни уравнения:

$$\beta = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} n\alpha, \quad (8-30)$$

лежащие в интервале $0 < \alpha < \pi$.

Формула (8-28) показывает, что ток может быть представлен суммой n гармонических составляющих. При условии $n\beta \ll 1$ ($nL'_{ш} \ll L_{н}$) первая гармоника тока много больше остальных, частоты которых близки между собой и в несколько раз превышают частоту первой гармоники. Амплитуда тока основной частоты в этом случае равна:

$$I_{m1} \approx U_0 / \sqrt{\frac{L_{н} + nL'_{ш}/3 + L_c/n}{C_{к}}}, \quad (8-31)$$

где $C_{к} = nC_c$ — емкость конденсатора.

Числитель подкоренного выражения представляет собой эквивалентную индуктивность контура в режиме установившихся колебаний

$$L_{\text{экв}} = L_{н} + nL'_{ш}/3 + L_c/n = L_{н} + L_{к}^{(1)}, \quad (8-32)$$

где

$$L_{к}^{(1)} = nL'_{ш}/3 + L_c/3; \quad (8-33)$$

$L_{к}^{(1)}$ является собственной эквивалентной индуктивностью конденсатора в режиме установившихся колебаний.

Как следует из (8-33), первый член в правой части равенства является эквивалентной индуктивностью шин

$$L_{ш} = nL'_{ш}/3. \quad (8-34)$$

Так как по (8-25)

$$L'_{ш} = \mu_0 l'_{ш} d_{ш} / b_{ш}, \quad (8-35)$$

где $l'_{ш}$ — длина участка шин между соседними секциями, то

$$L_{ш} = \mu_0 l_{ш.э} d_{ш} / 3b_{ш} = \mu_0 l_{ш.э} d_{ш} / b_{ш}, \quad (8-36)$$

где $l_{ш.э} = l_{ш}/3$ — эквивалентная длина шины.

Таким образом, в рассматриваемом случае при равномерном присоединении секций вдоль длины шины эквивалентная длина шины равна $1/3$ ее геометрической длины.

Крутизна тока в начальный момент времени

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_0}{L_n + \sqrt{L'_ш L_c} \operatorname{cth} n \sqrt{L'_ш L_c}} = \frac{U_0}{L_n + L_{(2)к}}, \quad (8-37)$$

где $L_{(2)к}$ — собственная эквивалентная индуктивность конденсатора в начальном режиме (при $t=0$), определяющая скорость нарастания тока в начальный момент времени.

Индуктивность $L_{(2)к}$ существенно отличается от индуктивности $L_{(1)к}$. Обычно $L_{(2)к}$ значительно меньше $L_{(1)к}$ (в первом приближении — на индуктивность шин $L_{ш}$).

Аналогичный результат получается при выводе формулы для эквивалентной индуктивности шин, если в качестве критерия эквивалентности двух систем принять равенство энергий, запасаемых в индуктивностях.

8-4. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНДЕНСАТОРА ПО РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЕ

В ряде случаев чрезвычайно важным является создание конденсаторов с предельно высокой собственной резонансной частотой

$$f_p = 1/2\pi \sqrt{L_{(1)к} C_{к}}.$$

Весьма важным является также требование минимального волнового сопротивления конденсаторов $\rho_{к} = \sqrt{L_{(1)к}/C_{к}}$, так как в этом случае можно получить максимальный ток при работе на малые нагрузки. Рассмотрим зависимость резонансной частоты и волнового сопротивления от габаритных размеров конденсатора.

Индуктивность секций конденсатора может быть оценена по формуле

$$L_c = \mu_0 l d_c / b_{\phi}. \quad (8-38)$$

Таким образом,

$$L_c = \mu_0 l d_c / 3b_{\phi} = \mu_0 S / 3b_{\phi}, \quad (8-39)$$

т. е. индуктивность рулонных секций определяется площадью $S = l d_c$, через которую проходит магнитный поток.

Для секции, имеющей одну пару выводов, расположенную в начале обкладки, площадь S может быть представлена в виде

$$S = ld_c = n_c H d_c = H h, \quad (8-40)$$

где $H = \pi D_{\text{ср}}/2$ — средняя длина слоя в секции; n_c — число слоев толщиной d_c в секции; $h \approx n_c d_c$ — общая толщина секции (рис. 8-1).

Следовательно, если габариты секции равны соответственно $b \approx b_{\text{ф}}$, H и h , то индуктивность такой секции приближенно может быть оценена по формуле

$$L_c = \mu_0 h H / 3b. \quad (8-41)$$

Например, для секции импульсных конденсаторов на напряжение 3 кВ, емкостью 1,0 мкФ, имеющей габариты $h = 1$ см, $H = 10$ см, $b = 30$ см, с одной парой выводов, расположенной в начале обкладки, индуктивность составит:

$$L_c = \mu_0 h H / 3b = 4\pi 10^{-7} \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1} / 3 \cdot 0,3 = 10^{-9} \text{ Г.}$$

Таким образом, индуктивность определяется основными габаритными размерами пространства h , H и b , занятого диэлектриком.

При увеличении числа пар выводов в секции, расположенных согласно рис. 8-6,б, индуктивность рулонной секции падает обратно пропорционально квадрату числа пар. При рациональном способе соединения рулонных секций индуктивность конденсатора L_K в первом приближении увеличивается прямо пропорционально числу секций, соединенных последовательно m и обратно пропорционально числу параллельно соединенных секций n :

$$L_K = L_c m / n. \quad (8-42)$$

Полная энергия секции конденсатора, имеющей размеры h , H и b , может быть определена из соотношения

$$W_c = W_{\text{уд}} V_c = \frac{\epsilon E_p^2}{2} h H b = \frac{C_c U_c^2}{2}, \quad (8-43)$$

где $V_c = h H b$ — объем секции конденсатора (рис. 8-1).

Учитывая (8-41) и (8-43), резонансную частоту секции $f_{\text{р.с}}$ можно представить в виде

$$f_{\text{р.с}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_c C_c}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\mu_0 h H}{3b} \frac{\epsilon E_p^2 h H b}{U_c^2}}} = \frac{U_c}{3,6 h H E_p \sqrt{\mu_0 \epsilon}}. \quad (8-44)$$

В качестве примера подсчитаем резонансную частоту секции с одной парой выводов в начале обкладок на напряжение 5 кВ, 1,0 мкФ, имеющей $E_p = 80$ МВ/м:

$$\begin{aligned} f_{p.c} &= \frac{U_c}{3,6hHE_p \sqrt{\mu_0 \varepsilon}} = \\ &= \frac{5 \cdot 10^3}{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 80 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}}} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Гц.} \end{aligned}$$

Для конденсаторов, собранных из рулонных секций, индуктивность может быть определена по (8-42). Учитывая, что емкость конденсатора в этом случае равна

$$C_K = C_c n / m, \quad (8-45)$$

можно заключить, что в этом случае резонансная частота конденсатора $f_{p.k}$ равна резонансной частоте секции $f_{p.c}$ и не зависит от размеров конденсатора. Основная трудность заключается в выборе рациональной конструкции соединений секции и вывода конденсатора.

Используя (8-41) и (8-43), определим волновое сопротивление секций

$$\rho_c = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}} = \sqrt{\frac{\mu_0 h H}{3b} \frac{U_c^2}{\varepsilon E_p^2 h H b}} = 0,58 \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} \frac{U_c}{E_p b}. \quad (8-46)$$

На основании (8-42) и (8-45) волновое сопротивление конденсатора может быть представлено в виде

$$\rho_K = \rho_c m / n. \quad (8-47)$$

Аналогичные по структуре формулы получаются и для расчета резонансной частоты и волнового сопротивления конденсатора из пластинчатых секций.

Таким образом, как следует из (8-44), увеличения резонансной частоты конденсатора можно добиться за счет сокращения размеров h и H , причем увеличение емкости конденсатора в единице целесообразно производить за счет увеличения размера b (или b_Φ), не влияющего на резонансную частоту конденсатора. В этом случае одновременно будет снижено волновое сопротивление конденсатора.

ПЕРЕГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

9-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕГРУЗОК КОНДЕНСАТОРА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Под перегрузочными характеристиками конденсатора понимается его способность выдерживать без снижения срока службы и надежности кратковременные или длительные нагрузки, превышающие номинальную. Поэтому уже при его проектировании должны быть учтены требования в части перегрузок и предусмотрены необходимые запасы. Уровень перегрузок может быть различным для различных типов конденсаторов, и его значение оговаривается в соответствующей технической документации.

Перегрузки могут быть различными не только по размеру, но и по характеру. В одном случае они являются длительными и носят тепловой характер. Например, при длительных повышениях напряжения при появлении в нем высших гармонических или при увеличении частоты следования импульсов в импульсном конденсаторе в нем происходит повышение тепловых потерь. Они не приводят к возникновению тепловой неустойчивости, но увеличивают температуру в изоляции, что может привести к снижению срока службы конденсатора. В другом случае длительное напряжение остается в пределах допустимого, но при этом конденсатор подвергается воздействию перенапряжений, уровень которых может превосходить порог возникновения критических ЧР. В этом случае имеет место ионизационное разрушение диэлектрика, при котором также увеличивается и его тепловая нагрузка вследствие повышения $\operatorname{tg} \delta$ за счет загрязнения пропитывающего состава продуктами ионизационного разложения. У конденсаторов с водяным охлаждением тепловые перегрузки диэлектрика могут возникать и вследствие недостаточного количества протекающей охлаждающей воды или ухудшения теплоотдачи за счет отложения на стенках охлаждающей системы нетеплопроводящих осадков из растворенных в воде неорганических солей.

При проектировании конденсаторов их параметры выбираются таким образом, чтобы обеспечить тепловую устойчивость и требуемый срок службы для наиболее

тяжелого случая тепловой нагрузки, т. е. при наибольшей допустимой емкости, наибольшем допустимом напряжении, предельно допустимом для данного типа значении $\operatorname{tg} \delta_d$ и максимально допустимой окружающей температуре. Конденсаторы не всегда работают в предельном тепловом режиме, при котором температура диэлектрика равна максимально допустимой t_d . В этих случаях конденсатор может быть дополнительно нагружен. Реактивная мощность при перегрузке будет различной в зависимости от того, является ли перегрузка длительной или кратковременной. Определим допустимую мощность перегрузки в случае ее длительного воздействия при работе конденсатора при синусоидальном напряжении, когда температура в изоляции достигает установившегося значения. Пусть конденсатор эксплуатируется в условиях, при которых установившаяся температура t_1 в нем была меньше допустимой, т. е. $t_1 < t_d$. Обозначим превышение температуры в этом режиме через Δt_1 , реактивную мощность — Q_1 и тангенс угла потерь — $\operatorname{tg} \delta_1$. Будем считать температуру t_2 , установившуюся при перегрузке, равной предельно допустимой, т. е. $t_2 = t_d$. Остальные параметры, соответствующие этому режиму, обозначим соответственно через Δt_d , Q'_d и $\operatorname{tg} \delta_d$; Q'_d представляет собой мощность, при которой в данных условиях эксплуатации достигается предельно допустимая установившаяся температура диэлектрика. Будем называть ее условно допустимой. Она может отличаться от действительной предельно допустимой мощности, определяемой в строго регламентированных условиях. Очевидно, что при $Q = Q'_d \operatorname{tg} \delta$ соответствует действительному предельно допустимому значению.

Рассмотрим количественные соотношения между температурой изоляции и мощностью перегрузки.

Если $t_1 < t_d$, то превышение температуры, как видно из (7-67), для первого режима составит:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = (Q_1 \operatorname{tg} \delta_1) / \Lambda, \quad (9-1)$$

а для второго режима, когда $t_2 = t_d$, соответственно

$$\Delta t_d = t_d - t_0 = (Q'_d \operatorname{tg} \delta_d) / \Lambda. \quad (9-2)$$

Из (9-1) и (9-2) найдем:

$$Q'_d = Q_1 \frac{\Delta t_d}{\Delta t_1} \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{\operatorname{tg} \delta_d}. \quad (9-3)$$

Перегрузки, соответствующие мощности Q'_d , конденсатор может выдерживать длительное время.

Определим время $\Delta\tau$ перегрузки конденсатора мощностью $Q > Q'_d$, при которой установившееся превышение $\Delta t_2 > \Delta t_d$ [Л. 9-1]. Зависимость температуры диэлектрика от времени для заданных потерь мощности описывается формулой (7-97), легко преобразуемой к виду

$$\Delta t = \Delta t_y (1 - e^{-\tau/\tau_0}), \quad (9-4)$$

где Δt_y — установившееся превышение; τ_0 — постоянная времени конденсатора.

На рис. 9-1 участок кривой $O-\tau_1$ представляет изменение нагрева конденсатора во времени под воздействием нагрузки $Q_1 < Q'_d$, причем в этом режиме конденсатор имеет установившееся превышение Δt_1 . Если в момент времени τ_1 конденсатор подвергается перегрузке мощностью $Q > Q'_d$, то изменение нагрева происходит по кривой, соответствующей $\tau > \tau_1$. Установившееся превышение в этом режиме равно $\Delta t_2 > \Delta t_1$. Изменение превышений на этом участке кривой определяется выражением

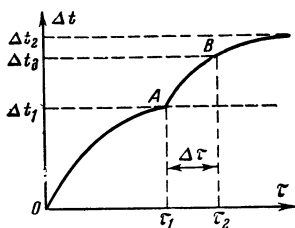


Рис. 9-1. Зависимость температуры нагрева диэлектрика конденсатора от времени.

$$\Delta t - \Delta t_1 = (\Delta t_2 - \Delta t_1) [1 - e^{-(\tau - \tau_1)/\tau_0}]. \quad (9-5)$$

Допустимое время воздействия перегрузки определяется временем $\Delta\tau$, в течение которого превышение температуры конденсатора достигает Δt_d :

$$\begin{aligned} \Delta t_d - \Delta t_1 &= (\Delta t_2 - \Delta t_1) [1 - e^{-(\tau_2 - \tau_1)/\tau_0}] = \\ &= (\Delta t_2 - \Delta t_1) (1 - e^{-\Delta\tau/\tau_0}). \end{aligned} \quad (9-6)$$

Из (9-6) имеем:

$$\Delta\tau = \tau_0 \ln \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_2 - \Delta t_d}. \quad (9-7)$$

Выражая превышения через соответствующие реактивные мощности, допустимое время воздействия перегрузок можно представить в виде

$$\Delta\tau = \tau_0 \ln \frac{Q \operatorname{tg} \delta - Q_1 \operatorname{tg} \delta_1}{Q \operatorname{tg} \delta - Q'_d \operatorname{tg} \delta_d}. \quad (9-8)$$

Полагая в первом приближении, что значения $\operatorname{tg} \delta$, соответствующие мощностям нагрузки Q_1 , Q'_d и Q , различаются незначительно и этим можно пренебречь, (9-7) можно привести к виду

$$\Delta\tau = \tau_0 \ln \frac{Q - Q_1}{Q - Q'_d}. \quad (9-9)$$

Заменяя

$$Q_1 = Q'_d - \Delta Q_n, \quad (9-10)$$

где ΔQ_n — «мощность недогрузки» по отношению к условно допустимой, и подставляя (9-10) в (9-8), находим:

$$\Delta\tau = \tau_0 \ln \frac{Q - Q'_d + \Delta Q_n}{Q - Q'_d} = \tau_0 \ln \left(1 + \frac{\Delta Q_n}{Q - Q'_d} \right), \quad (9-11)$$

где $\Delta Q_n = Q - Q'_d$ — мощность перегрузки по отношению к условно допустимой.

При наличии в питающем напряжении высших гармонических вначале производится расчет потерь мощности в конденсаторе (§ 6-3) и затем оценивается возможность и длительность его перегрузки. Для этого используется (9-8), в которой произведения $Q \operatorname{tg} \delta$ заменяются значениями потерь активной мощности. При определении перегрузок следует учитывать также и то обстоятельство, что ток через конденсатор не может превышать допустимое для его токоведущих частей и выводов значение.

Глава десятая

СРОК СЛУЖБЫ И НАДЕЖНОСТЬ КОНДЕНСАТОРА

10-1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА И ВИДЫ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ

В процессе эксплуатации конденсаторов под воздействием температуры и приложенного напряжения изоляция претерпевает необратимые изменения, в результате которых ухудшаются ее диэлектрические свойства и характеристики. Это ухудшение нарастает со временем эксплуатации и имеет следствием возникновение отказа, т. е. прекращение выполнения конденсатором возложенных на него функций. Ухудшение характеристик в процессе эксплуатации вследствие физических и химических изменений в диэлектрике и составляет сущность старе-

ния. В его основе лежат процессы необратимого разложения, деструкции и полимеризации компонентов и разрушение или эрозия твердой фазы диэлектрика частичными разрядами (ЧР). Конденсатор сохраняет свою работоспособность до тех пор, пока его электрическая прочность не снизится до значения, при котором наступает пробой, или пока его $\lg \delta$ не достигнет значения, соответствующего границе тепловой устойчивости, после чего наступает тепловой пробой.

Старение диэлектрика имеет три формы: тепловую, при которой скорость процесса деструкции клетчатки, составляющего сущность ее старения, определяется температурой; ионизационную, при которой диэлектрик разрушается возникающими в нем ЧР, и электрохимическую, при которой старение имеет электролитическую природу. Старение зависит от многих факторов: качества и свойств компонентов, технологии изготовления конденсаторов, решающим звеном которой является процесс термовакуумной обработки, конструктивных, а также температурного и электрического режима его работы.

Характер процессов и скорость старения зависят также от типа твердого и жидкого диэлектрика, их структуры, состава, используемого для пропитки. Существенное влияние на процессы старения может оказать введение различных стабилизирующих добавок, связывающих ионные загрязнения в диэлектрике, а также продукты, образующиеся в процессе старения диэлектрика и ухудшающие свойства изоляции. На процессы старения оказывает влияние также форма и частота приложенного напряжения. Разрушение или эрозия твердой фазы определяется интенсивностью возникающих в диэлектрике ЧР. Разложение и деструкция конденсаторной бумаги и пропиточного вещества могут быть вызваны электрохимическими процессами и температурным воздействием. При пропитке нефтяными маслами одновременно имеет место разложение и полимеризация углеводородов. Продуктами разложения и полимеризации являются водород, вода, органические кислоты, хлористый водород, окись углерода, углекислый газ, α -воск и др. Состав продуктов разложения диэлектрика, появившийся в результате его теплового старения под напряжением и без него, существенно различен.

В находящемся в эксплуатации конденсаторе одновременно существует несколько форм старения, напри-

мер, тепловая и ионизационная, тепловая и электрохимическая. При определенных условиях одна из форм может превалировать над другой и определять срок службы конденсатора. Существуют факторы, способные ускорить процесс старения изоляции. Так, например, к ним относятся ионные загрязнения в бумаге и в пропиточной жидкости; неоднородности структуры бумаги, локальные изменения ее толщины и плотности, приводящие к местному повышению напряженности поля; недосушивание и высокое остаточное газосодержание пропиточной жидкости (недосушивание интенсифицирует гидролиз бумаги, следствием которого является понижение степени полимеризации и ее механической прочности, а повышенное остаточное влагосодержание облегчает возникновение ЧР, резко снижающих надежность и срок службы конденсатора). Таким образом, старение изоляции может происходить неравномерно по его объему. Тепловая форма старения диэлектрика может иметь место при работе его как на постоянном, так и на переменном напряжении, так как закономерности теплового старения определяются только количеством тепла, выделяющимся в диэлектрике. При постоянном напряжении потери значительно меньше, чем при переменном, поэтому тепловое старение наиболее сильно проявляется в конденсаторах, работающих при переменном напряжении. Ионизационная форма старения имеет место как при переменном, так и при постоянном напряжении. В связи с тем, что интенсивность ЧР значительно больше при переменном напряжении, то и ионизационное старение наиболее сильно проявляется при этом виде напряжения. Электрохимическое старение преимущественно развивается при постоянном напряжении. При воздействии на диэлектрик смешанного напряжения, одновременно содержащего постоянную и переменную составляющие, имеет место несколько форм старения одновременно. Интенсивность каждой из них зависит от соотношения между постоянной и переменной составляющими.

10-2. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛОВОГО СТАРЕНИЯ КЛЕТЧАТКИ

При длительном воздействии температуры на полимерные материалы происходят необратимые изменения их физических, механических и электрических характери-

стик, обусловленные структурными изменениями вследствие процессов полимеризации и поликонденсации, окислительных процессов и термической деструкции полимеров. Здесь рассмотрим изменения свойств бумаги, происходящие только под действием температуры.

Термическая деструкция представляет собой химическую реакцию распада молекулы клетчатки, в которой участвует только один тип молекул. Скорость мономолекулярной реакции описывается уравнением

$$dN/d\tau = -cN, \quad (10-1)$$

где N — концентрация реагирующего вещества; c — константа скорости реакции, представляющая собой скорость реакции при концентрации реагирующих веществ, равной единице.

Для бумаги N представляет собой степень полимеризации клетчатки. Если при $\tau=0$ начальная степень полимеризации $N=N_0$, то, используя (10-1), можно определить:

$$N = N_0 e^{-c\tau}. \quad (10-2)$$

Количество распавшихся к моменту времени τ молекул равно:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-c\tau}). \quad (10-3)$$

Константа скорости реакции c связана с абсолютной температурой соотношением Аррениуса

$$d \ln c / dT = W_a / RT^2, \quad (10-4)$$

где W_a — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная.

Параметр $W_a/R = b$ для условий силового конденсатора может считаться постоянным. После его подстановки в (10-4) и последующего интегрирования найдем:

$$c = B e^{-b/T}, \quad (10-5)$$

где B — постоянная, характеризующая специфические особенности, свойственные данной реакции.

Окончательная формула процесса термической деструкции принимает вид:

$$N = N_0 e^{-B\tau e^{-b/T}}. \quad (10-6)$$

Поделим обе части (10-6) на N_0 , обозначим отношение $N/N_0 = v$ и назовем его относительной степенью полимеризации. Очевидно, $0 \leq v \leq 1$. Тогда

$$v = e^{-B\tau e^{-b/T}}. \quad (10-7)$$

Из (10-7) следует, что при $T = \text{const}$ относительная степень полимеризации v экспоненциально зависит от времени воздействия температуры. На рис. 10-1 приве-

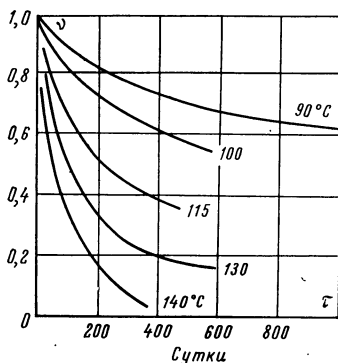


Рис. 10-1 Зависимость изменения относительной степени полимеризации от времени при различных температурах.

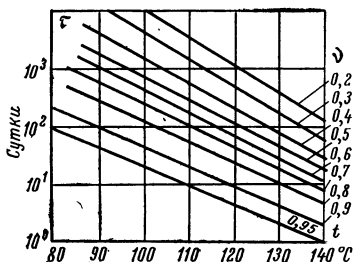


Рис. 10-2. Зависимость времени достижения заданной относительной степени полимеризации от температуры.

дены экспериментальные зависимости $v = v(\tau)$, полученные в [Л. 10-1]. Эти зависимости также являются экспонентами. После логарифмирования (10-7) получим:

$$\ln v = -B\tau e^{-b/T}. \quad (10-8)$$

Так как при $T = \text{const}$ $Be^{-b/T} = \text{const}$, то (10-8) является уравнением прямой. Логарифмируя (10-8) еще раз, получим:

$$\ln \ln v^{-1} = \ln B - b/T + \ln \tau. \quad (10-9)$$

Задаваясь относительной степенью полимеризации v_1 и учитывая, что значение B постоянно, из (10-9) можно найти связь между температурой и временем, в течение которого может быть достигнута заданная относительная степень полимеризации клетчатки. Если задать предельно допустимую степень полимеризации, то (10-9) выра-

зит связь между сроком службы изоляции и температурой:

$$\ln \tau = \ln \frac{\ln v_1^{-1}}{B} + \frac{b}{T}, \quad (10-10)$$

и так как

$$\ln \frac{\ln v_1^{-1}}{B} = \text{const} = H,$$

то

$$\ln \tau = H + b/T. \quad (10-11)$$

Из (10-11) видно, что логарифм срока службы является линейной функцией обратного значения абсолютной температуры диэлектрика. Оно может быть приближен-

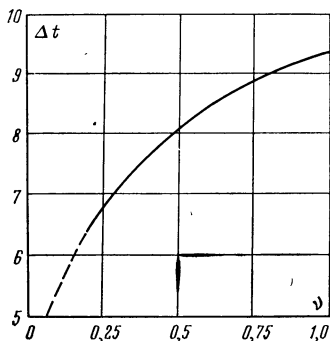


Рис. 10-3. Зависимость изменения температуры, вдвое изменяющей срок службы клетчатки, от относительной степени полимеризации.

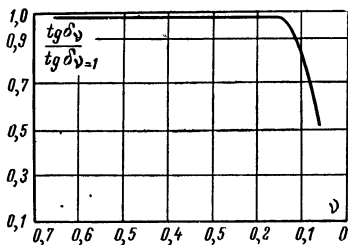


Рис. 10-4. Зависимость максимума $\text{tg } \delta$ клетчатки от относительной степени полимеризации.

но преобразовано от абсолютной температуры T к обычной шкале Цельсия t , $^{\circ}\text{C}$. После преобразования формула принимает вид (при $t \leq 100^{\circ}\text{C}$):

$$\ln \tau = H' - mt, \quad (10-12)$$

где $H' = H + b/T_0$; $m = b/T_0^2$; T_0 — окружающая температура, К.

На рис. 10-2 [Л. 10-1] приведены экспериментально полученные зависимости времени достижения данной относительной степени полимеризации от температуры. Эти зависимости являются прямыми линиями и по своему характеру согласуются с теоретическими зависимостями, описываемыми (10-12).

Закономерность, выражаемая (10-12), совпадает с экспериментальной зависимостью, полученной ранее при исследованиях лакотканей [Л. 10-2], в которой H' и m предполагались постоянными и по которой следует, что изменение температуры на $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ изменяет срок службы клетчатки вдвое. Однако практически значение Δt , изменяющее срок службы вдвое, находится в пределах $5-10^\circ\text{C}$. Эта закономерность известна как «правило десяти градусов». Исследования [Л. 10-1] показали, что значение Δt , изменяющее срок службы клетчатки вдвое, есть функция степени ее полимеризации v . Этим и объясняются различные значения Δt , полученные ранее экспериментально. На рис. 10-3 приведена экспериментальная зависимость Δt от v .

На рис. 10-4 [Л. 10-3] показана зависимость отношения дипольного максимума $\text{tg } \delta$ клетчатки при данной относительной степени полимеризации к значению $\text{tg } \delta$, соответствующему $v=1$. Как видим, заметное изменение дипольного максимума наступает только при очень низкой степени полимеризации, равной или меньшей 150.

Время, необходимое для достижения степени полимеризации $v=150$, при термическом старении в вакууме при начальной влажности 0,03% составляет:

t , $^\circ\text{C}$	80	85	90	95	100	105	110	115
Годы	1200	650	350	180	95	50	28	14

Наличие влаги и кислорода может существенно ускорять процесс деструкции клетчатки. Так, бумага, работающая в условиях свободного доступа кислорода воздуха, старится в 2,5 раза быстрее, чем та же бумага, работающая без доступа кислорода.

Для диапазона влагосодержания бумаги 0,3—7% для не очень малых значений конечной степени полимеризации — 500—600 скорость термической деструкции приблизительно может считаться пропорциональной содержанию влаги. При более низкой степени полимеризации влияние влаги усиливается.

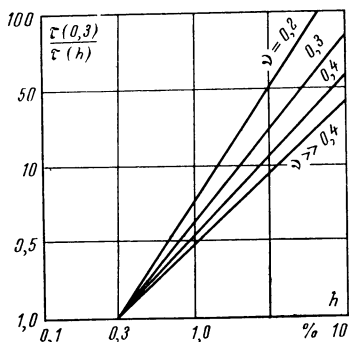


Рис. 10-5. Влияние влажности на время достижения заданной степени полимеризации.

ется. На рис. 10-5 [Л. 10-1] показано влияние влажности на время достижения заданной степени полимеризации. По оси абсцисс отложено отношение времени достижения заданной относительной степени полимеризации γ при влажности 0,3% ко времени достижения той же степени полимеризации при влажности h , %. В процессе деструкции клетчатки происходит выделение воды, количество которой увеличивается с понижением степени полимеризации. Образование воды происходит при разрушении глюкозных колец.

10-3. ИОНИЗАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ

Основной причиной электрического старения изоляции, т. е. старения при длительном приложении рабочего напряжения, являются ЧР. Существование ЧР при относительно низких напряжениях, близких к рабочим, вызывает прежде всего разложение пропитывающего состава. Разрушение жидких диэлектриков под действием ЧР заключается, главным образом в разрыве молекулярных связей углеводов и образовании радикалов. Возможен и обратный процесс: сшивание молекул или присоединение радикалов. Эти явления связаны с выделением водорода или других газов водородного происхождения: метана, углекислого газа и пр. Возможно также образование кислот, агрессивно действующих на твердый диэлектрик, углеродистых соединений, имеющих значительную проводимость. Продукты разложения могут агрессивно взаимодействовать с клетчаткой, приводя к потере электрической прочности изоляции. Разрушение пропитывающего состава сказывается также на возрастании его проводимости, что проявляется в изменении зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения в области малых на-

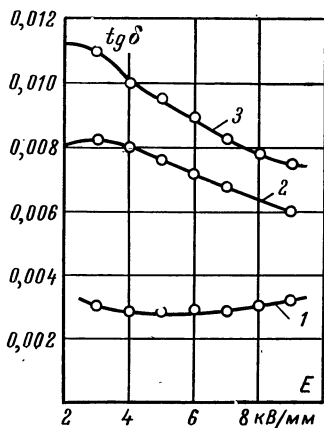


Рис. 10-6. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряженности для образцов бумажно-масляной изоляции.

1 — до выдержки под напряжением; 2 — после выдержки под напряжением $2U_{\text{раб}}$ в течение 1300 ч; 3 — после дополнительной выдержки под напряжением $2U_{\text{раб}}$ в течение 1900 ч.

пряжений (рис. 10-6) [Л. 10-4], и повышении его значения, что создает опасность развития теплового пробоя. Осциллографирование тока потерь в такой изоляции показывает, что в этом случае появляется характерный пик

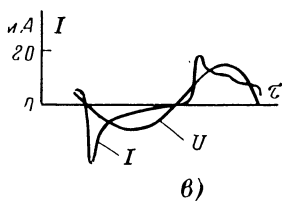
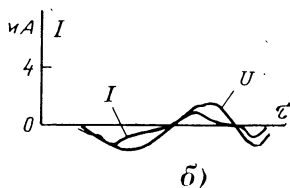
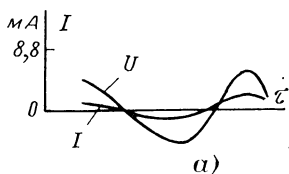


Рис. 10-7. Осциллограммы тока потерь в секциях бумажно-масляных конденсаторов, бывших различного времени в эксплуатации при $E = 15,5$ кВ/мм.

a — новый конденсатор; $б$ — после 1 года эксплуатации; $в$ — после 5 лет эксплуатации.

в токе потерь (рис. 10-7). В результате такого старения в основном изменяются электрические характеристики практически всего объема жидкого диэлектрика, что завершается либо ионизационным, либо тепловым пробоем изоляции.

В конденсаторах, пропитанных нефтяным маслом, под воздействием ЧР происходит прежде всего разложение пропитывающего состава, сопровождающееся газовыделением и воскообразованием. В образовавшихся газовых включениях возникают разряды значительно большей интенсивности (критические ЧР), приводящие к дальнейшему росту включений, снижению напряжения критических ЧР, разрушению клетчатки и пробое изоляции. Как известно (гл. 4), скорость газовыделения зависит от мощности ЧР $P_{чр}$, коэффициента газостойкости масла и определяется формулой (4-18). Условие возникновения сосредоточенных газовых включений определяется (4-19) и зависит от энергии ЧР, выделившейся в изоляции за определенное время. Повышение газостойкости масла замедляет процессы старения бумажно-масляной изоляции.

В бумажных конденсаторах, пропитанных хлордифенилами, разрушение пропитывающего состава под воздействием ЧР происходит главным образом путем отрыва атомов водорода и хлора от молекул хлордифенилов. Вследствие наличия в составе хлордифенилов большого количества непредельных углеводородов газовыделения под воздействием ЧР обычно не происходит, так как

либо атомы водорода и хлора присоединяются молекулами, либо вследствие высокого сродства хлора к водороду образуется хлористый водород. Кроме того, под воздействием ЧР из хлордифенилов выделяется углерод в виде сажи [Л. 2-30, 10-6]. Появление HCl вызывает разрушение твердого диэлектрика (бумаги, пленки). Влияние продуктов разложения на характеристики изоляции с пропиткой хлордифенилами проявляется прежде всего в повышении $\operatorname{tg} \delta$ и проводимости изоляции [Л. 10-6], что может привести к нарушению тепловой устойчивости конденсатора в процессе эксплуатации. В этом случае возникновение теплового пробоя является следствием изменения характеристик изоляции под воздействием ЧР. Между $\operatorname{tg} \delta$ и концентрацией хлористого водорода и углерода в изоляции существует определенная связь. Концентрация продуктов разложения в свою очередь зависит от энергии ЧР, расходуемой в изоляции [Л. 10-7], поэтому значение $\operatorname{tg} \delta$ зависит от энергии ЧР, выделявшейся в изоляции за определенное время. В бумажной изоляции, пропитанной как нефтяными маслами, так и хлордифенилами, возможно выделение газа под воздействием ЧР вследствие разложения оставшейся в бумаге влаги [Л. 10-8]. Это особенно сильно проявляется в изоляции, подвергнутой недостаточно хорошей термовакуумной обработке, и существенно уменьшается с улучшением процесса сушки и пропитки.

Интенсивность ионизационного старения существенно зависит от наличия твердых проводящих включений, увеличивающих локальные значения напряженности электрического поля. Твердые проводящие частицы разных размеров как фиксированные, содержащиеся в конденсаторной бумаге, так и подвижные, могут попадать в секцию конденсатора во время намотки или находиться во взвешенном состоянии в пропитывающей жидкости. В диэлектрике вследствие местного различия слоев по толщине возникают полости, в которых частицы примесей могут приводить к образованию мостиков, искажающих поле. Кроме того, при подходе частицы к электроду между частицей и электродом возникает разряд, приводящий к разложению жидкого диэлектрика.

В [Л. 10-9] было проведено испытание 11 непропитанных конденсаторных секций, полученных от трех поставщиков конденсаторов для определения количества частиц, попавших в секцию во время намотки. Средняя

концентрация частиц составила около 100 тыс. шт/м². Это относилось ко всем частицам размером более 2 мкм, среди которых было частиц 2—7 мкм 80—90%, 7—13 мкм 40—20% и более 13 мкм 1%. Исследования трихлордифенила в готовых конденсаторах показали, что количество частиц в нем составляло 30—100 тыс./мл, причем частицы размером 2—7 мкм составляют 70—90% их общего количества. Общее число частиц в конденсаторах с трихлордифенилом может достигать $3 \cdot 10^6$ шт/м², т. е. 3 частицы на 1 мм². Распределение частиц в реальных конденсаторах неравномерно, и локальная концентрация может быть очень большой. Частицы могут перемещаться вдоль края фольги, по складкам бумаги, т. е. там, где есть прослойка жидкости увеличенной толщины. Повышая локальную напряженность, твердые частицы могут влиять на срок службы конденсаторов. В [Л. 10-9] приводятся результаты испытаний опытных конденсаторов, пропитанных трихлордифенилом, при 90°C при ступенчатом повышении напряжения промышленной частоты с выдержкой на каждой ступени в течение 10 мин. Общий срок службы до пробоя составил: для исходных конденсаторов 48 ± 5 мин, для конденсаторов с содержанием в пропиточной жидкости алюминиевого порошка: 0,027 г/л — 21 ± 4 мин; 2 г/л — менее 1 мин; для конденсаторов с содержанием в пропиточной жидкости углерода 0,0003 г/л — 26 ± 3 мин; 0,0010 г/л — 19 ± 2 мин.

10-4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ

Электрохимическое разрушение наиболее сильно проявляется при постоянном напряжении или напряжении промышленной частоты в отсутствие ЧР. В этих процессах основную роль играют электролитические процессы. Интенсивность разрушения зависит от тока утечки — ионного тока [Л. 1-1]. У положительно заряженных обкладок ионы, теряя свой заряд, могут образовывать активные вещества, вступающие в реакцию с металлом обкладки и диэлектриком. У отрицательно заряженных обкладок катионы (металлические ионы), теряя свой заряд, могут приводить к образованию в толще диэлектрика проводящих дендритов, прорастание которых от обкладок может привести к снижению электрической прочности.

Электролитические процессы, связанные с разложением углеводородных соединений, в присутствии остаточной влаги могут привести к образованию пузырьков газа и возникновению ЧР в изоляции. Кроме того, атомарный водород может способствовать процессам гидрогенизации, а атомарный кислород — окислительным процессам, ухудшающим диэлектрические свойства изоляции и приводящим к возрастанию $\operatorname{tg} \delta$ и проводимости диэлектрика.

Электролитическое старение на постоянном напряжении происходит весьма интенсивно в конденсаторах, пропитанных хлорированными жидкостями. Образующиеся в процессе электролиза атомы водорода и хлора приводят к образованию HCl , разрушительно действующего на клетчатку и на алюминиевые обкладки (образуется хлористый алюминий AlCl_3). Кроме того, хлористый алюминий является активным катализатором, способствующим дальнейшему разложению хлорированных жидкостей. Добавка в пропитывающий состав стабилизатора антрахинона способствует существенному ослаблению электрохимического старения изоляции конденсаторов с пропиткой хлорированными жидкостями. Это объясняется способностью антрахинона связывать свободные атомы водорода и хлора, обрывать этим возникающие химические реакции [Л. 10-10]. Окислительные процессы могут привести к образованию воды, ухудшающей диэлектрические характеристики и способствующей электролитическому разрушению изоляции.

В конденсаторах с изоляцией из неполярных пленок ток утечки весьма мал и поэтому процессы электрохимического старения практически отсутствуют. Однако в конденсаторах с синтетическими полярными пленками возможны процессы гидролиза, приводящие к разрушению пленки. В триацетатных пленках под воздействием постоянного напряжения при повышенных температурах возникает разложение пленки с выделением уксусной кислоты [Л. 1-1]. В ряде случаев электрохимические процессы могут приводить к улучшению характеристик изоляции. Так, например, в конденсаторах, пропитанных касторовым маслом, под воздействием длительно приложенного постоянного напряжения на обкладках (преимущественно на анодной) образуется пленка твердого вещества, обладающая высоким удельным электрическим сопротивлением [Л. 10-11]. Это приводит к возрастанию

сопротивления изоляции конденсатора и увеличению электрической прочности прослоек жидкого диэлектрика у обкладок.

10-5. ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ В ПРОЦЕССЕ СТАРЕНИЯ

В эксплуатации в результате процессов старения происходит снижение электрической прочности изоляции. Основной причиной снижения электрической прочности являются ЧР, причем скорость протекания химических реакций, происходящих в результате развития ЧР, возрастает с ростом температуры диэлектрика. В связи с этим пробивное напряжение конденсатора зависит от времени выдержки конденсатора под напряжением (срока службы) и температуры диэлектрика.

Температура диэлектрика зависит как от напряженности электрического поля (что определяет тепловыделение в единице объема), так и от конструкции конденсатора и условий его эксплуатации (условия охлаждения, температура окружающей среды и пр.).

Определение зависимости пробивного напряжения конденсаторов от времени выдержки $U_{пр} = f(\tau)$ требует весьма длительных экспериментов, проведение которых в лабораторных условиях крайне затруднительно. Поэтому при определении указанной зависимости время выдержки редко превосходит сотни часов, причем эта зависимость вынужденно снимается в области напряжений, значительно (в 2 раза и более) превышающих нормальное рабочее напряжение изоляции. Чаще всего зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ изоляции конденсаторов от времени выдержки τ в определенном интервале времен хорошо выражается формулой

$$U_{пр} = A\tau^{-a}, \quad (10-13)$$

где показатель степени a зависит от рода действующего напряжения, напряженности, толщины диэлектрика, вида изоляции, технологии изготовления. Характерные зависимости срока службы от напряженности электрического поля при переменном напряжении 50 Гц и постоянном напряжении для бумажно-масляной изоляции приведены на рис. 10-8. Эти зависимости хорошо отображаются формулой (10-13), в которой для переменного напряжения $a = 5 \div 8$ и для постоянного $a =$

$= 8 \div 14$. Для конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, по данным [Л. 10-12] зависимость срока службы от напряжения и температуры конденсатора может быть представлена в виде, вытекающем из (10-13):

$$\tau = A / (Ut)^{1,7}. \quad (10-14)$$

По данным [Л. 1-5] срок службы τ конденсаторов в зависимости от температуры t и напряженности E может быть представлен в виде

$$\tau = \tau_0 e^{-bt} (E_0/E)^a, \quad (10-15)$$

где τ_0 — срок службы при напряженности E_0 ; a и b — константы.

Уменьшение плотности бумаги γ приводит к уменьшению кратковременной электрической прочности изоляции и увеличивает напряжение возникновения ЧР (гл. 4)

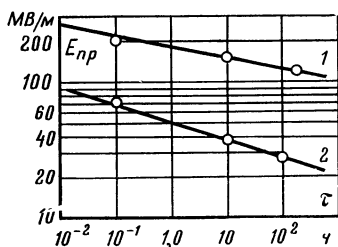


Рис. 10-8. Зависимость пробивного напряжения конденсаторной изоляции от времени выдержки при переменном напряжении промышленной частоты (1) и при постоянном напряжении (2), $d_c = 80$ мкм.

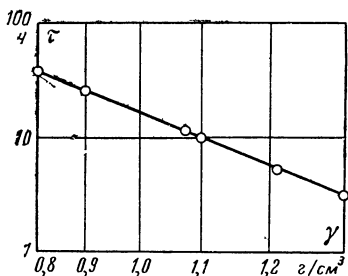


Рис. 10-9. Влияние плотности конденсаторной бумаги на средний срок службы бумажно-масляных секций ($d_c = 6 \times 12$ мкм).

вследствие уменьшения напряженности в прослойках жидкого диэлектрика, если его диэлектрическая проницаемость меньше диэлектрической проницаемости клетчатки. Это увеличивает срок службы конденсаторов с изоляцией из бумаги с пониженной плотностью. На рис. 10-9 представлена зависимость среднего срока службы бумажно-масляных секций от плотности бумаги, иллюстрирующая это положение [Л. 10-13].

Уменьшение толщины изоляции секции приводит к увеличению напряженности ЧР и замедлению процессов электрического старения при заданных рабочих на-

пряженностях. Это проявляется в увеличении показателя a с уменьшением толщины диэлектрика (рис. 10-10) [Л. 10-13]. В [Л. 10-14] предложена формула, связывающая срок службы конденсаторов τ , бумажно-масляных конденсаторов с напряженностью E , кВ/мм, частотой f , Гц толщиной диэлектрика d , мкм, температурой t , °C,

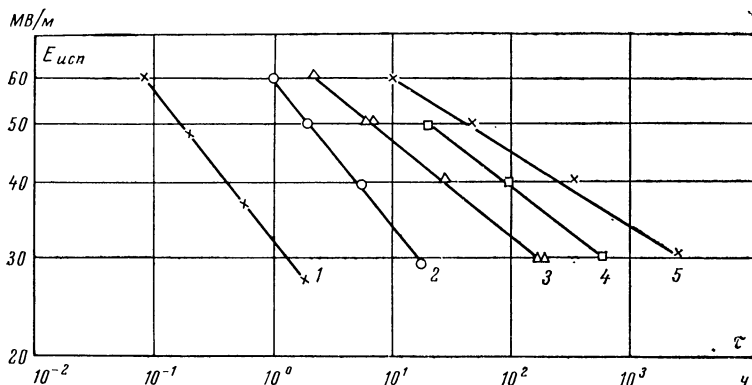


Рис. 10-10. Влияние испытательной напряженности электрического поля на средний срок службы секций с разной толщиной диэлектрика между обкладками.

1—7×12 мкм; 2—6×12 мкм; 3—5×12 мкм; 4—4×12 мкм; 5—3×12 мкм.

удельным газовыделением нефтяного масла B , см³/Дж, исходным газосодержанием пропитывающего состава K_T (% по объему), плотностью бумаги γ , г/см³:

$$\tau = C \cdot 10^{(g - bt)} / (E a f^l d^m c B a \gamma^k K p_r), \quad (10-16)$$

где C — постоянная, зависящая от условий испытания; $g=10$; $b=0,1$; $l=0,8$; $K=5 \div 6$; $p=0,7$; $a=11,6-0,0856d$; $m=10-0,1E$; для бумажно-трихлордифениловой изоляции $g=6,11$; $b=0,0357$.

Так как процессы старения при напряженностях, близких к рабочим (кроме процессов окисления), связаны с развитием начальных ЧР, то можно предположить, что срок службы изоляции обратно пропорционален мощности ЧР. Для количественной оценки степени разрушения целесообразно воспользоваться энергетической характеристикой диэлектриков, связывающей энергию, переданную веществу, и степень его разрушения. Энергетическая характеристика B имеет физический смысл количества вещества, разрушенного (образованного или

выделенного) при воздействии разрядов с энергией 1 Дж, и измеряется в г/Дж или см³/Дж [Л. 8-1].

Изоляция обладает способностью в течение определенного времени выдерживать приложенное напряжение и противостоять разрушающему действию процессов, протекающих при этом напряжении. Эта способность может быть охарактеризована ресурсом изоляции R , который определяется количеством твердого, жидкого или газообразного вещества, которое должно быть разрушено (образовано или выделено) для того, чтобы привести к нарушению или резкому снижению электрической прочности изоляционной конструкции. Ресурс изоляции зависит от структуры и размеров изоляции, видов диэлектриков, входящих в эту структуру, а также конструкции изоляции, расположения электродов и их формы. Для конденсаторов, в которых основное разрушение диэлектрика происходит по краю обкладок, целесообразно ресурс изоляции относить к единице длины края обкладок.

Для заданной изоляционной конструкции при изменении напряжения в определенных пределах в первом приближении этот ресурс может быть принят постоянным. В этом случае срок службы изоляции может быть определен из выражения

$$R = B \int_0^{\tau} P_{\text{ч.р}} d\tau. \quad (10-17)$$

В первом приближении можно принять, что на протяжении всего срока службы мощность ЧР $P_{\text{ч.р}}$ не изменяется во времени, так как обычно значительное изменение (увеличение) мощности ЧР происходит непосредственно перед пробоем изоляции, тогда

$$\tau = R/BP_{\text{ч.р}}. \quad (10-18)$$

При этом для изоляции, пропитанной нефтяным маслом, можно считать, что срок службы определяется временем, необходимым для образования газовых пузырьков, после появления которых напряжение ЧР сильно снижается, появляются критические ЧР, т. е. резко возрастает интенсивность разрядов и происходит быстрое разрушение изоляции. В этом случае срок службы изоляции выражается (4-25). Так как обычно $h_{\text{ч.р}} \ll \beta H_0$, то

$$\tau \approx H_0/h_{\text{ч.р}}. \quad (10-19)$$

Учитывая (4-17) и (4-18), при атмосферном давлении имеем:

$$\tau \approx C_T V_{ж} / B P_{ч.р}. \quad (10-20)$$

В этой формуле зависимость $P_{ч.р}$ от напряжения для переменного напряжения выражается (4-14), а для постоянного — 4-45). При этом

$$\tau = C_T V_{ж} / B A_2 U^a = A U^{-a}, \quad (10-21)$$

где для переменного напряжения промышленной частоты $a=5 \div 7$, а для постоянного напряжения $a=8 \div 14$.

Формула (10-21) для переменного и постоянного напряжений достаточно хорошо соответствует экспериментально полученным зависимостям.

В конденсаторах, пропитанных трихлордифенилом, срок службы определяется предельным увеличением $\operatorname{tg} \delta$ изоляции за счет разложения хлордифенилов ЧР и взаимодействия продуктов разложения с твердым диэлектриком (§ 2-3). Предельно допустимые значения $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов при рабочих напряженностях могут быть рассчитаны (гл. 7). Поэтому для расчета срока службы конденсаторов с пропиткой хлордифенилами необходимо знать зависимость $\operatorname{tg} \delta$ изоляции от энергии ЧР, выделяемой в конденсаторах. Эти зависимости могут быть установлены экспериментально. Зная предельно допустимые значения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции, можно на основании этих зависимостей определить энергию ЧР W_0 , затраченную на повышение $\operatorname{tg} \delta$ изоляции до значения, соответствующего нарушению тепловой устойчивости конденсатора. При этом срок службы конденсатора будет равен:

$$\tau = W_0 / P_{ч.р}. \quad (10-22)$$

Учитывая зависимость мощности ЧР $P_{ч.р}$ от напряженности электрического поля в соответствии с (4-14), можно получить зависимость срока службы конденсатора от напряженности электрического поля

$$\tau = W_0 / A'_2 E^a = A_3 E^{-a}. \quad (10-23)$$

10-6. НАДЕЖНОСТЬ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Под надежностью изделия понимается его свойство выполнять заданные функции в заданных условиях эксплуатации в течение требуемого промежутка времени, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах. Она обеспечивается ремонтпригодностью, безотказностью, сохраняемостью и долговечностью его

элементов [Л. 10-15]. В применении к силовым конденсаторам это определение несколько упрощается. Силовые конденсаторы относятся к неремонтируемым изделиям, т. е. изделиям, работающим до первого отказа, поэтому требование о ремонтопригодности отпадает. При хранении в надлежащих условиях сохраняемость силового конденсатора высокая, и она практически не оказывает влияния на его надежность. Таким образом, надежность силового конденсатора определяется только его долговечностью и безотказностью. Долговечность и безотказность — это свойства, практически неразделимые в применении к силовому конденсатору. Они описываются одной и той же функцией распределения, следовательно, каждое из этих свойств независимо определяет надежность силового конденсатора. Прекращение конденсатором выполнения своих функций вследствие возникших в нем дефектов (пробой и т. п.) или изменения его параметров сверх допустимых значений, при которых происходит нарушение нормальной работы устройства, где он установлен, называется его отказом. Отказы конденсаторов делятся на случайные, причины возникновения которых носят чисто случайный характер, и отказы, возникающие вследствие старения и износа диэлектрика. В обоих случаях время, прошедшее от момента включения до момента отказа, является случайным. Несмотря на большое разнообразие типов, конструктивных особенностей, режимов и условий эксплуатации и т. п., силовые конденсаторы имеют ряд общих свойств с точки зрения исследования их надежности.

Характерной особенностью изоляции конденсатора, как и изоляции любой другой электроизоляционной конструкции, работающей в силовой электротехнике, является то, что составляющие ее диэлектрические материалы эксплуатируются практически до полного износа [Л. 10-16]. Запас работоспособности изоляции или ее способности противостоять действию разрушающих процессов, протекающих в ней при эксплуатации, ограничен. Он зависит от качества и свойств материалов, технологии изготовления конденсаторов и главным образом процесса термовакуумной обработки, конструкции и т. п. Время τ , в течение которого этот запас может быть израсходован, зависит от режима работы изоляции

$$\tau = f(E_p, t), \quad (10-24)$$

где E_p — рабочая напряженность; t — температура изоляции.

Эта формула выражает ресурс конденсатора, являющийся его важной технико-экономической характеристикой. Для подавляющего большинства конденсаторов ресурс задается в виде времени. В ряде импульсных конденсаторов он может быть задан количеством заряд-разрядных циклов (импульсов), которые он должен выдерживать. В этом случае ресурс является функцией напряженности поля, частоты следования импульсов и параметров разрядного контура, главным образом — декремента колебаний. Для наиболее многочисленной группы конденсаторов, используемых для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной частоты, на основании большого объема исследований, а также мирового опыта эксплуатации конденсаторов оптимальным обычно принимается ресурс примерно 20 лет, такой ресурс должно иметь не менее 90% продукции.

Аналитический расчет показателей надежности практически неосуществим, поэтому испытания и опыт эксплуатации являются основными источниками информации об их надежности. Особенность оценки надежности конденсаторов состоит в том, что методы оценки

должны обеспечивать контроль надежности за все время работы изоляции, а не только в исходный момент, т. е. должно учитываться старение диэлектрика, составляющее существо его износа. Поэтому испытания на надежность должны производиться в ускоренном режиме в течение времени, эквивалентного ресурсу конденсатора.

Длительность испытаний определяется из соотношений, связывающих срок службы (или ресурс) конденсатора с параметрами режима его работы. При выборе режима ускоренных испытаний прежде всего следует обеспечить подобие процессов в форсированном и нормальном режимах. Так, например, при испытаниях на переменном напряжении испытательная напряженность поля должна быть ниже напряженности возникновения критических ЧР, а температура диэлектрика должна быть ниже температуры термической неустойчивости. Если не будут соблюдены эти условия, то картина нормального старения будет искажена. Кроме того, испытания при выбранном режиме не должны продолжаться слишком долго, так как иначе они могут потерять свою актуальность. Для конденсаторов промышленной частоты испытательная напряженность $E_{исп}$ обычно выбирается в пределах $(1,3-1,6)E_{ном}$ и выдерживается заданное испытательное время $\tau_{исп}$, определяемое на основании (10-14):

$$\tau_{исп} = (E_{ном} t_{ном} / E_{исп} t_{исп})^{1,7} \tau_{ном}. \quad (10-25)$$

Кроме испытаний длительным воздействием повышенного напряжения, для конденсаторов промышленной частоты производятся испытания кратковременными перенапряжениями. При этих испытаниях на конденсатор обычно длительно воздействует напряжение промышленной частоты $(1,1-1,2)U_{ном}$ и через определенные промежутки времени (5-10 мин) подается повышенное напряжение промышленной частоты длительною около 1 с. Число таких перенапряжений в процессе одного испытания обычно принимается равным 1000. В процессе испытаний не должно происходить изменения $\tan \delta$ изоляции конденсатора и характеристик ЧР.

Надежность импульсных конденсаторов определяется чаще всего длительным испытанием требуемого числа конденсаторов в номинальном режиме. Это объясняется тем, что в импульсных конденсаторах применяются весьма высокие рабочие напряженности, близкие к электрической прочности, что не позволяет испытывать конденсаторы в форсированном по напряженности режиме. Кроме того, ограниченный срок службы (обычно 10^4 импульсов) также позволяет проводить эти испытания только в рабочем режиме. При испытаниях необходимо обращать внимание на параметры разрядного контура, которые должны обеспечивать требуемый декремент колебаний и амплитуду разрядного тока.

Наиболее общим показателем надежности силовых конденсаторов является вероятность безотказной работы $p(\tau)$ в течение времени, соответствующего его ресурсу или сроку службы τ . Использование функции $p(\tau)$ в качестве единого контролируемого показателя надежности вместо любых других особенно удобно потому, что контроль $p(\tau)$ при фиксированном τ производится совершенно одинаково для любых законов распределения времени безотказной работы [Л. 10-17]. Так, например, у конденсаторов для повышения коэффициента мощности $P \geq 0,9$ при $\tau \geq 20$ лет. Эти значения могут быть приняты в качестве критерия при проведении контрольных испытаний на надежность текущей продукции.

Опыт показывает, что различные образцы одного типа конденсатора, изготовленные в идентичных условиях, обладают различной надежностью, установить которую для каждого индивидуального образца невозможно, так как на одном конденсаторе может быть получена только одна реализация случайного значения, что недостаточно. Поэтому объектом испытаний на надежность обычно является целая партия. Устанавливаемое в результате испытаний значение показателя надежности относится ко всей партии, т. е. к каждому входящему в партию образцу, при этом все образцы партии полагаются равнонадежными. Хотя различия в свойствах надежности отдельных образцов конденсаторов одного типа не могут быть установлены, это не является доказательством того, что таких различий вообще нет. Обозначим плотность распределения вероятности возникновения отказа (или дифференциальную функцию распределения) для i -го образца через $f_i(\tau)$. Тогда вероятность безотказной работы $p_i(\tau)$ на протяжении фиксированного отрезка времени τ равна [Л. 10-17]:

$$p_i(\tau) = 1 - \int_0^{\tau} f_i(\tau) d\tau, \quad (10-26)$$

а для партии из N конденсаторов

$$p_{\text{партии}}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i(\tau). \quad (10-27)$$

При испытаниях определяется именно этот параметр, рассматриваемый как единый показатель надежности для образцов партии в целом.

Задачи, решаемые при испытаниях на надежность, могут быть двоякими. В одних случаях требуется определить неизвестные числовые значения показателей надежности, влияние на них изменения различных факторов и т. п. Такие испытания носят исследовательский характер и называются определительными. В других случаях необходимо проверить соответствие показателей надежности данной конкретной партии изделий требованиям нормативно-технической документации. Также испытания называются контрольными. Различия в целях испытаний обуславливают и различия в методах их планирования и проведения, обработки данных и т. п. При оценке надежности силовых конденсаторов полностью применимы общие положения теории надежности [Л. 10-18] с учетом их специфики. Испытания конденсаторов могут проводиться методами однократной или двукратной выборки. Метод однократной выборки применим при первичной оценке надежности изделий с любым уровнем надежности и известным или неизвестным законом распределения отказов. Метод двукратной выборки обычно применяется для оценки надежности изделий с минимальным уровнем надежности $R_{\text{мин}} \geq 0,9$. В ряде случаев метод двукратной выборки может дать экономию в количестве испытываемых изделий, не снижая достоверности результатов.

Количество подлежащих испытанию конденсаторов зависит от ряда факторов: требуемого уровня надежности, рисков изготовителя и заказчика, приемочного числа (количество допустимых отказов при испытаниях) и т. п. Для определения объема испытываемой вы-

борки используются таблицы, приведенные в [Л. 10-19]. Если принять приведенные выше показатели надежности конденсаторов для повышения коэффициента мощности за контрольные, то при испытаниях по методу однократной выборки для приемочного числа, равного нулю, объем выборки n может быть определен из формулы [Л. 10-19]

$$n = \lg(1 - P^*) / \lg(1 - q), \quad (10-28)$$

где q — допустимая доля отхода конденсаторов к концу срока службы, в нашем случае $q = 0,1$; P^* — вероятность того, что $q \leq 0,1$; обычно $P^* = 0,9$.

Эргодическое правило допускает уменьшение объема выборки за счет увеличения времени испытаний, т. е. произведение объема выборки на время испытаний должно оставаться неизменным. Поскольку для силовых конденсаторов испытательное время определяется режимом испытаний, оно не может произвольно изменяться. Поэтому эргодическое правило не может быть использовано [Л. 10-5].

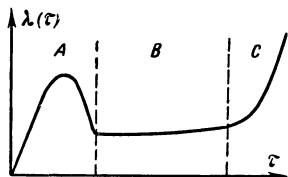


Рис. 10-11. Изменение интенсивности отказов в процессе эксплуатации конденсаторов.

Участок A соответствует началу эксплуатации, и интенсивность отказов на нем возрастает от нуля до некоторого максимума, а к концу периода спадает до некоторого уровня, сохраняющегося на участке нормальной эксплуатации. Это период *приработки*, и отказы здесь обусловлены грубыми дефектами производства или материалов, которые не могли быть обнаружены во время приемо-сдаточных испытаний. Во время нормальной эксплуатации (участок B) интенсивность отказов слабо возрастает вследствие старения изоляции в процессе эксплуатации. На участке C интенсивность отказов снова существенно возрастает вследствие появления износовых отказов, обусловленных значительным старением диэлектрика.

Глава одиннадцатая

ВЫБОР РАБОЧЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

11-1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ДОПУСТИМОЙ РАБОЧЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

Рабочая напряженность в изоляции силовых конденсаторов должна выбираться с учетом длительно действующего рабочего напряжения и кратковременных перенапряжений, действующих на конденсатор в процессе эксплуатации. При выборе рабочей напряженности

по длительно воздействующему рабочему напряжению должны обеспечиваться: а) отсутствие недопустимого нагрева диэлектрика за счет потерь, выделяющихся в конденсаторе; б) требуемый срок службы, который прежде всего определяется допустимой интенсивностью начальных ЧР. Какой из указанных факторов превалирует при старении, зависит от вида используемых материалов. Например, для бумажной изоляции, пропитанной хлордифенилами, определяющим при выборе E_p является тепловой режим; в случае пропитки бумаги нефтяным маслом — ЧР. При выборе рабочей напряженности по кратковременным перенапряжениям должны обеспечиваться: а) отсутствие пробоя изоляции, что определяется кратковременной ее прочностью; б) отсутствие необратимых повреждений и ухудшений характеристик изоляции при воздействии перенапряжений, что определяется интенсивностью критических ЧР.

Для повышения удельных характеристик конденсатора следует повышать рабочую напряженность E_p , что, однако, повлечет за собой рост потерь мощности и может привести к снижению его ресурса. Количество тепла, отводимое от конденсатора, ограничено; наряду с характеристиками ЧР это определяет верхний предел E_p . Наибольшая допустимая для данного диэлектрика температура изоляции определяется заданным ресурсом; для бумажного диэлектрика с хлордифениловой пропиткой, работающего при технической частоте, наибольшая допустимая рабочая температура диэлектрика, обеспечивающая экономически целесообразный ресурс, равна примерно 95°C. Такая же предельная рабочая температура допустима и для комбинированного бумажно-плёночного диэлектрика с хлордифениловой пропиткой. Для бумажно-масляного диэлектрика наибольшая допустимая рабочая температура составляет около 65°C. При проектировании конденсатора должен быть предусмотрен определенный запас по его термической устойчивости. В конденсаторах для повышения коэффициента мощности с диэлектриком из конденсаторной бумаги, пропитанной трихлордифенилом, при среднем качестве бумаги температура, соответствующая термической стабильности, составляет около 120—125°C. Используя изложенное на основании тепловых расчетов, приведенных в гл. 7, определяется значение E_p , которое затем согласуется с рассчитанным по допустимым значениям характеристик

ЧР во всем температурном диапазоне работы конденсатора. Поэтому для данного диэлектрика должны быть известны зависимости напряженности возникновения начальных и критических ЧР от температуры и толщины.

11-2. ВЫБОР РАБОЧЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Для бумажно-масляной изоляции рабочие напряженности определяются допустимой мощностью ЧР, при которой за требуемый срок службы изоляции исключено возникновение сосредоточенных газовых включений, возникающих при условии (4-19). Тогда для заданного срока службы τ из (10-20) можно найти допустимую мощность ЧР

$$P_{\text{ч.р. доп}} \leq C_{\Gamma} V_{\text{ж}} / B \tau \quad (11-1)$$

и, учитывая зависимость мощности ЧР от напряженности по (4-14), допустимую рабочую напряженность электрического поля

$$E_p = \left(\frac{C_{\Gamma} V_{\text{ж}}}{A_3 B \tau} \right)^{1/a}. \quad (11-2)$$

Подсчеты показывают, что для бумажно-масляной изоляции конденсаторов, имеющей толщину 50—80 мкм, при среднем сроке службы около 30 лет при напряжении промышленной частоты допустимая рабочая напряженность составляет 12—14 МВ/м.

В [Л. 4-8] приводится зависимость рабочей напряженности, МВ/м, от толщины конденсаторной бумажно-масляной изоляции для бумаги КОН-I с толщиной листа 10—12 мкм

$$E_p = 3,3 d_c^{-0,58}, \quad (11-3)$$

(d_c выражено в миллиметрах).

Для изоляции с пропиткой хлордифенилами допустимые рабочие напряженности могут определяться также допустимой мощностью ЧР. Используя (10-23), имеем:

$$E_p = (W_0 / \tau A_3)^{1/a}. \quad (11-4)$$

При этом в связи со значительно большей стабильностью поведения хлордифенилов в электрическом поле рабочие напряженности, МВ/м могут быть существенно

увеличены по сравнению с изоляцией, пропитанной нефтяным маслом:

$$E_p = 4,3d_c^{-0,58}, \quad (11-5)$$

что соответствует $E_p = 16 \div 20$ МВ/м для изоляции толщиной 50—80 мкм (d_c выражено в миллиметрах).

Однако, столь высокие рабочие напряженности могут привести к недопустимому нагреву конденсатора и выходу его из теплового равновесия. Поэтому применение указанных рабочих напряженностей возможно только одновременно с применением ряда мероприятий по снижению $\operatorname{tg} \delta$ изоляции от $(2 \div 2,5) 10^{-3}$ до $(1,2 \div 1,5) 10^{-3}$. Это достигается за счет применения малопотерной конденсаторной бумаги пониженной плотности, оксидной бумаги, специальных эпоксидных соединений, добавляемых в хлордифенилы, уменьшающих возрастание $\operatorname{tg} \delta$ в процессе эксплуатации, и других мероприятий.

Для изоляции с применением неполярных синтетических пленок (в основном полипропиленовых), имеющих лучшие по сравнению с бумагой электрические характеристики, рабочая напряженность может быть еще больше увеличена за счет снижения общей толщины изоляции.

Использование в конденсаторной изоляции различных диэлектрических материалов приводит к разному распределению напряженности по отдельным компонентам изоляции (гл. 3).

Напряженность E_i в i -й компоненте n -компонентной изоляции равна:

$$E_i = \frac{d_c}{k \varepsilon_i \sum_j \frac{d_j}{\varepsilon_j}} E', \quad (11-6)$$

где E' — средняя напряженность в изоляции между обкладками; d_j — толщина слоя изоляции с диэлектрической проницаемостью ε_j .

Из (11-6) следует, что наличие неполярной пленки с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{п}}$ меньшей диэлектрической проницаемости пропитывающей жидкости $\varepsilon_{\text{ж}}$ приводит к уменьшению напряженности в пропитывающем составе и увеличению напряженности в пленке.

На рис. 11-1 [Л. 11-1] приведены зависимости напряженности электрического поля в отдельных составляю-

щих бумажно-пленочной изоляции при пропитке нефтяным маслом и трихлордифенилом от процентного содержания пленки по отношению к объему всей изоляции. Как следует из рис. 11-1, при пропитке нефтяным маслом электрическая перегрузка пленки и масла примерно одинакова и почти вдвое превышает нагрузку пропитанной бумаги. Пленка оказывается нагруженной ниже, а нефтяное масло значительно выше своих возможностей. При

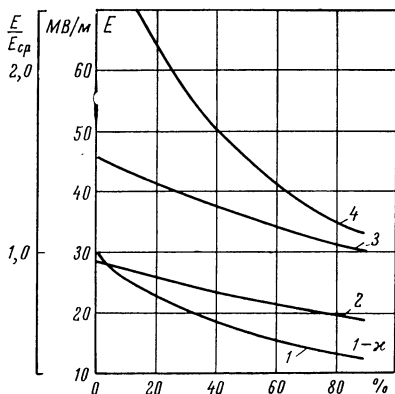


Рис. 11-1. Влияние содержания пленки (%) на напряженность электрического поля в отдельных компонентах.

1 — в трихлордифениле и пропитанной им бумаге; 2 — в пропитанной нефтяным маслом бумаге; 3 — в нефтяном масле и пленке при пропитке нефтяным маслом; 4 — в пленке при пропитке трихлордифенилом. Кривые получены при коэффициенте запрессовки 0,9 и средней напряженности 30 МВ/м.

использовании пропитывающей жидкости с повышенной диэлектрической проницаемостью (трихлордифенил) напряженность в пропитывающем составе и пропитанной бумаге значительно ниже, чем в случае, когда пропитка осуществляется маслом, а нагрузка на пленку наоборот, увеличивается. Поэтому пропитка бумажно-пленочного диэлектрика трихлордифенилом позволяет увеличить среднюю напряженность электрического поля при неизменной напряженности в пропитывающей жидкости и пропитанной бумаге. Применение неполярных пленок приводит также к уменьшению $\lg \delta$ изоляции, что позволяет повысить допустимые напряженности, ограничивающие нагрев изоляции.

Рабочие напряженности комбинированной бумажно-масляной изоляции целесообразно выбирать так, чтобы бумага, пропитанная жидким диэлектриком, работала при рабочих напряженностях, которые могут быть определены по (11-3) или (11-5). При этом средняя рабочая напряженность комбинированного диэлектрика зависит от относительного содержания в нем бумаги κ [Л. 11-2]

$$E_{\text{комб}} = E_6[(1-\kappa)\epsilon_6 + \kappa\epsilon_{\text{п}}]/\epsilon_{\text{п}}. \quad (11-7)$$

Удельная энергия конденсатора с комбинированным диэлектриком равна:

$$\begin{aligned} W_{\text{уд.комб}} &= \varepsilon_{\text{ср}} E_{\text{ср}}^2 / 2 = \varepsilon_6 E_6^2 [(1 - \kappa) \varepsilon_6 + \kappa \varepsilon_{\text{п}}] / 2 \varepsilon_{\text{п}} = \\ &= W_{\text{уд.б}} = [(1 - \kappa) \varepsilon_6 + \kappa \varepsilon_{\text{п}}] / \varepsilon_{\text{п}}, \end{aligned} \quad (11-8)$$

где $W_{\text{уд.б}} = \varepsilon_6 E_6^2 / 2$ — удельная энергия аналогичного конденсатора с бумажным диэлектриком. Выражение (11-8) может быть представлено также в следующем виде [Л. 11-3]:

$$W_{\text{уд.б}} / W_{\text{уд.комб}} = \varepsilon_{\text{п}} / [(1 - \kappa) \varepsilon_6 + \kappa \varepsilon_{\text{п}}]. \quad (11-9)$$

С ростом содержания пленки $(1 - \kappa)$ в комбинированном диэлектрике значение $W_{\text{уд.комб}}$ будет возрастать и скорость приращения будет тем больше, чем больше отношение $\varepsilon_6 / \varepsilon_{\text{п}}$. Как показывает опыт создания конденсаторов с комбинированным диэлектриком, при расчетной толщине секции $d_{\text{с}} = 60$ мкм допустимые рабочие напряженности могут быть приняты: в бумаге, пропитанной трихлордифенилом, 16—18 МВ/м, в комбинированной изоляции при $1 - \kappa = 30 \div 40\%$ 30—37 МВ/м, в пленке — 40—50 МВ/м.

Уровень технологии изготовления конденсатора — остаточное давление и температура при термовакuumной обработке, чистота и общая культура технологического процесса — могут также оказывать заметное влияние на рабочую напряженность. В современных бумажных конденсаторах с трихлордифениловой пропиткой, работающих на частоте 50—60 Гц, при материалах высокого качества и высоком уровне технологии рабочая напряженность поля при пониженных толщинах диэлектрика (50—60 мкм) может достигать до 22—22,5 МВ/м, при этом обеспечивается ресурс, равный 20 годам для 90% конденсаторов.

Надежная работа конденсатора может быть обеспечена только в том случае, когда температура и напряженность поля в диэлектрике не будут превосходить значений, соответствующих данному ресурсу. Однако без ущерба для ресурса могут быть допустимы кратковременные перегрузки по напряжению. Для конденсаторов, работающих при напряжении промышленной частоты, не содержащем высокочастотных составляющих, кратность и время действия перенапряжений, не снижающих ресурса конденсатора, указаны в табл. 11-1 [Л. 11-4].

Для коммутационных перенапряжений, по тем же

источникам, допустимая кратность в зависимости от числа коммутаций в году приведена в табл. 11-2.

Таблица 11-1

Кратности допустимых перенапряжений (по отношению к номинальному) в зависимости от времени их воздействия

Параметр	Время действия							
	Периоды				Секунды	Минуты		
Длительность	1/2	1	15	60	15	1	5	30
Кратность	3,0	2,7	2,0	1,75	1,4	1,3	1,2	1,15

Выбранное с учетом перечисленных факторов значение E_p проверяется экспериментально на опытных образцах конденсаторов. При этом определяются тепловые характеристики конденсатора (в том числе температура наиболее нагретой части диэлектрика при помощи термопары) и проводятся испытания на срок службы при повышенных значениях напряженности электрического

Таблица 11-2

Допустимые кратности коммутационных перенапряжений и токов по отношению к номинальным действующим значениям в зависимости от числа коммутаций в году

Параметр	Предполагаемое число коммутаций в году			
	4	40	400	4000
Перенапряжения	5	4	3,4	2,9
Амплитуды тока переходного режима	1500	1150	800	400

поля и температуры окружающей среды. Необходимо принимать во внимание, что повышение рабочей напряженности и температуры в процессе испытаний могут производиться только в ограниченных пределах, когда не происходит изменения характера процессов старения изоляции конденсатора. Обычно принимают напряженность длительных испытаний на срок службы $E_{исп} = (1,3 \div 1,6) E_p$.

В конденсаторах повышенной частоты (до 10 кГц) с бумажно-хлордифениловым диэлектриком рабочая напряженность определяется практически только тепловым режимом (§ 1-2).

Количество тепла, отводимое конструкцией конденсаторов, не зависит от рабочей частоты конденсатора и одинаково для всех частот. Поэтому потери мощности в конденсаторе не должны превышать некоторое значение, одинаковое для всех частот. Вместо потерь можно пользоваться выражением, определяющим потери в диэлектрике (гл. 5):

$$fE_p^2 \operatorname{tg} \delta = A, \quad (11-10)$$

где A — некоторая постоянная.

Значение $\operatorname{tg} \delta$ в конденсаторах повышенной частоты может иметь значительную зависимость от частоты, что необходимо учитывать. Из (11-10) следует:

$$E_p = \sqrt{A/f \operatorname{tg} \delta}. \quad (11-11)$$

Определив из теплового расчета значение A для одной из указанных выше частот и пользуясь (11-11), можно рассчитать E_p для конденсаторов с другими рабочими частотами. Как и для конденсаторов технической частоты, расчет проверяется на опытных образцах, после чего в него вносятся коррективы.

11-3. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РАБОЧИХ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ДЛЯ КОНДЕНСАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ПОСТОЯННОМ И ИМПУЛЬСНОМ НАПРЯЖЕНИЯХ

Выбор рабочих напряженностей для конденсаторов, работающих при постоянном напряжении, производится с учетом электрохимического старения диэлектрика и старения под воздействием ЧР, а также воздействующих на конденсатор перенапряжений в процессе эксплуатации. При выборе рабочих напряженностей должна быть также учтена длительность ожидаемой эксплуатации конденсатора под напряжением. Так, например, в конденсаторах для испытательных установок постоянного напряжения, работающих с большими перерывами, допустимые рабочие напряженности могут быть увеличены по сравнению с конденсаторами, непрерывно находящимися под воздействием постоянного напряжения.

Если конденсатор работает при наличии переменной составляющей (пульсациях напряжения), то необходимо отдельно выбирать рабочую напряженность для пере-

менной и постоянной составляющих напряжения. При этом необходимо учитывать, что допустимая рабочая напряженность для переменной составляющей должна быть снижена приблизительно на 20% по сравнению с переменным напряжением, так как наложение постоянного напряжения уменьшает напряжение начальных ЧР на 15—20% [Л. 4-8].

Для конденсаторов, непрерывно работающих при постоянном напряжении, рабочая напряженность принимается равной 35—40 МВ/м. Для конденсаторов, работающих в испытательных схемах, эта напряженность может быть увеличена до 60—80 МВ/м. Для импульсных конденсаторов выбор допустимых рабочих напряженностей определяется: 1) кратковременной электрической прочностью изоляции; 2) характеристиками ЧР. При этом необходимо учитывать, что импульсное напряжение воздействует на конденсатор в течение весьма ограниченного времени, что позволяет существенно повысить допустимую рабочую напряженность.

Расчет допустимых рабочих напряженностей при ограниченном сроке службы импульсного конденсатора (порядка 10^4 импульсов и малой частоте повторения — менее 10 имп/мин) приводит к значениям, лежащим между E_n и $E_{кр}$. Так, для конденсаторов с изоляцией толщиной 100 мкм из конденсаторной бумаги КОН-II, пропитанной конденсаторным маслом, рабочую напряженность можно принять равной 60—65 МВ/м. При значительном сокращении срока службы она может быть увеличена до 80 МВ/м. Для изоляции из бумаги КОН-II, пропитанной касторовым маслом или хлорированными жидкими диэлектриками вследствие большей стойкости этих диэлектриков к воздействию ЧР, для срока службы порядка 10^4 импульсов рабочую напряженность можно повысить до 80 МВ/м. При сокращении срока службы примерно до 10^3 импульсов рабочая напряженность может быть увеличена до 100—120 МВ/м. Для бумажно-пленочной и пленочной изоляции вследствие уменьшения напряженности в прослойке жидкого диэлектрика рабочая напряженность принимается выше, чем для бумажной, и достигает в отдельных конструкциях импульсных конденсаторов с ограниченным сроком службы до 200 МВ/м.

При большой частоте следования импульсов (более 10 имп/мин) рабочая напряженность конденсаторов может определяться также тепловым режимом его работы.

Расчет допустимых рабочих напряженностей или перепада температуры в конденсаторе в этом случае практически не отличается от расчета для конденсаторов промышленной частоты.

Глава двенадцатая

ОСНОВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

12-1. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ИСПЫТАНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Силовые конденсаторы могут эксплуатироваться в самых различных условиях, которые обычно оговариваются в техническом задании на разработку. Конденсатор должен быть так спроектирован, чтобы в заданных условиях он проработал требуемый срок. Соответствие разрабатываемого конденсатора заданным требованиям проверяется при его разработке в процессе конструкторских испытаний, а качество конденсаторов при массовом производстве — приемосдаточными и периодическими испытаниями. Объем испытаний отдельных типов конденсаторов регламентируется технической документацией на них и включает в себя измерение емкости, $\operatorname{tg} \delta$ (для конденсаторов, работающих при постоянном напряжении, еще и сопротивление изоляции), кратковременные испытания повышенным напряжением, ускоренные испытания на срок службы, испытания на термическую стабильность в течение определенного времени, импульсные испытания, измерение характеристик ЧР и т. п. Ускоренные испытания на срок службы рассмотрены в гл. 10.

Условия эксплуатации конденсаторов и конденсаторных батарей, предназначенных для повышения коэффициента мощности в сетях переменного тока промышленной частоты, и условия их испытаний регламентируются публикацией 70 Международной Электротехнической комиссии (МЭК) [Л. 12-1], рекомендации которой должны учитываться при создании национальных нормативно-технических документов. В этом документе регламентируются окружающие температурные условия, перегрузки, испытательные напряжения и т. п.

По температуре окружающей среды конденсаторы разбиваются на ряд температурных категорий. Каждая

категория характеризуется одновременно двумя значениями окружающей температуры: минимальным, при котором допускается включение конденсатора под напряжение, и максимальным, при котором конденсатор может работать. Для минимальной температуры в [Л. 12-1] устанавливаются три значения: -40 , -25 и -10°C . Для верхней температурной границы также установлено три значения: $+40$, $+45$ и $+50^{\circ}\text{C}$. Температурные категории могут иметь любую комбинацию нижней и верхней температур. Верхние пределы температурной категории должны удовлетворять требованиям табл. 12-1.

Таблица 12-1

Верхние пределы температуры

Верхний предел температурной категории, $^{\circ}\text{C}$	Наибольшая температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$		
	средняя за 1 ч	средняя за 24 ч	средняя за год
40	40	30	20
45	45	40	30
50	50	45	35

По [Л. 12-1] нормальными температурными категориями являются категории с границами: $-40/+40^{\circ}\text{C}$; $-25/+40^{\circ}\text{C}$; $-10/+40^{\circ}\text{C}$; $-10/+45^{\circ}\text{C}$. Конденсаторы могут работать при температуре, меньшей минимальной температуры окружающей среды, которая соответствует их категории при условии, если они не будут включаться под напряжение при этой температуре. Допускаются перерывы в работе во время эксплуатации конденсаторов при температурах ниже минимальной, однако последующее включение их может производиться при температуре не ниже минимальной. Под температурой окружающей среды для одиночного конденсатора понимается температура, измеренная на расстоянии 30 см от его корпуса и на $2/3$ высоты, считая от основания. Для конденсаторной батареи за температуру охлаждающего воздуха принимается температура, измеренная в ее самой горячей точке в середине между двумя конденсаторами. Испытания конденсаторов могут проводиться при окружающей температуре от $+15$ до $+35^{\circ}\text{C}$. Базовой температурой, при которой должны вводиться поправки, является $+20^{\circ}\text{C}$.

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности в сетях переменного тока промышленной частоты

должны допускать длительную работу при повышении действующего значения напряжения между выводами до $1,1U_{\text{ном}}$, при действующем значении тока до 1,3 тока, полученного при номинальном напряжении и номинальной частоте, как за счет повышения напряжения, так и за счет высших гармонических или за счет того и другого вместе независимо от гармонического состава тока. При испытаниях повышенным напряжением испытательное напряжение между обкладками должно составлять при частоте 50 Гц $2,15U_{\text{ном}}$, при постоянном напряжении $4,3U_{\text{ном}}$. Значения испытательных напряжений при 50 Гц для испытаний изоляции на корпус приведены в табл. 5-1. Помимо постоянного или переменного испытательного напряжения, изоляция конденсатора от корпуса должна выдерживать испытания импульсным напряжением стандартной волны 1,2/50 мкс, амплитуда которой зависит от номинального напряжения конденсатора [Л. 5-2], а изоляция между обкладками — испытание разрядами конденсатора накоротко при его заряде постоянным напряжением до $2U_{\text{ном}}$.

12-2. ИСПЫТАНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ

Испытание конденсаторов на термическую стабильность проводится при их нагрузке испытательной реактивной мощностью $Q_{\text{исп}} = 1,44Q_{\text{ном}}$. Испытательное напряжение, обеспечивающее заданную перегрузку конденсатора по мощности, определяется из соотношения

$$U_{\text{исп}} = 1,2U_{\text{ном}} \sqrt{C_{\text{ном}}/C_{\text{исп}}}, \quad (12-1)$$

где $C_{\text{ном}}$ — номинальная емкость; $C_{\text{исп}}$ — емкость испытуемого конденсатора.

Испытательное напряжение должно быть практически синусоидальным. Температура охлаждающего воздуха при испытаниях должна быть на 5°C выше верхнего предела данной температурной категории, и ее колебания не должны превышать $+2^{\circ}\text{C}$. За 10 ч до конца испытаний производятся измерения $\text{tg } \delta$ или температуры корпуса конденсатора, которые должны оставаться неизменными в пределах точности измерения этих параметров ($\pm 10^{-4}$ при измерении $\text{tg } \delta$ и $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ при измерении температуры корпуса) [Л. 5-2].

Условия эксплуатации и требования к испытаниям электротермических конденсаторов на частоты 40—24 000 Гц приведены в публикации 110 МЭК [Л. 12-2], относящейся к конденсаторам как с принудительным воздушным или водяным охлаждением, так и с естественным воздушным охлаждением. Электротермические конденсаторы также разбиваются по температурным категориям. Верхние пределы температур этих категорий должны соответствовать требованиям табл. 12-2. Ниж-

Таблица 12-2

Верхние пределы температур

Вид охлаждения	Максимальная температура охлаждающей среды при длительной работе, °C			
	Температура охлаждающего воздуха для конденсаторов с естественным охлаждением	Температура охлаждающей среды на входе	Температура охлаждающей среды на выходе	Температура окружающего воздуха для конденсаторов с водяным охлаждением
Естественное воздушное	{ 40 45	— —	— —	— —
Принудительное воздушное	{ — —	35 40	40 45	— —
Водяное	{ — —	30 35	40 40	50 50

ние пределы температур составляют —25, —10 и 0°C.

Рекомендуемая испытательная мощность при проверке тепловой стабильности конденсаторов на номинальную частоту 40—60 Гц составляет $1,2Q_{\text{ном}}$ и $1,33Q_{\text{ном}}$ для конденсаторов на частоты свыше 60 Гц. Длительность этого испытания составляет 48 ч для конденсаторов с естественным воздушным охлаждением и 12 ч для конденсаторов с принудительным воздушным и водяным охлаждением. Во время конечного периода испытаний, продолжающегося 8 ч для всех типов конденсаторов с любыми режимами охлаждения, через каждые 2 ч измеряются потери ($\text{tg } \delta$) или температура корпуса конденсатора в верхней его части. В течение этого периода температура не должна возрасти более чем на 1°C. Для определения потерь в конденсаторах с водяным охлаждением рекомендуется формула [Л. 12-2]:

$$P = 70q\Delta t, \quad (12-2)$$

где q — расход воды, л/мин; Δt — разность выходной и входной температур охлаждающей воды, °C; P — потери, Вт.

Во время этого испытания конденсатор должен быть помещен в теплоизоляционный материал, чтобы исключить рассеяние тепла боковой поверхностью корпуса. Потери в конденсаторах с естественным и принудительным воздушным охлаждением рекомендуется определять калориметрическим методом. Остальные требования и условия испытаний аналогичны приведенным выше соответствующим требованиям и условиям испытаний конденсаторов для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной частоты.

Требования к испытаниям конденсаторов связи и делителей напряжения регламентируются публикацией 358 МЭК [Л. 12-3] и ГОСТ 15581-70 «Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности и измерения напряжения в фарфоровых корпусах» [Л. 12-4]. За исключением некоторых специфичных вопросов (измерение температурного коэффициента изменения емкости, эквивалентная емкость на частотах связи и пр.), требования к испытаниям этих конденсаторов аналогичны изложенным выше. Для определения эквивалентной емкости конденсатора связи C_s и эквивалентного последовательного сопротивления r_s на высокой частоте в [Л. 12-3] рекомендуется мостовая схема, показанная на рис. 12-1. После уравнивания моста $r_s = r_m$ и $C_s = C_m$. Если метод моста не может быть использован, параметры C_s и r_s вычисляются по формулам:

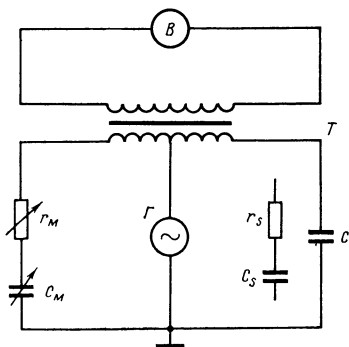


Рис. 12-1. Схема измерения (мостовой метод) эквивалентной емкости и эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора связи.

C_s — испытуемый конденсатор связи; C_s — его эквивалентная емкость и r_s — эквивалентное последовательное сопротивление на высокой частоте; C_m и r_m — регулируемые емкость и сопротивление; T — трансформатор; G — генератор; V — вольтметр.

$$C_s = C_p (1 + 1/\omega^2 C_p^2 R_p^2); \quad (12-3)$$

$$r_s = r_p / (1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2), \quad (12-4)$$

где C_p — емкость и r_p — сопротивление по параллельной схеме замещения.

12-3. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Основные характеристики частичных разрядов, подлежащие измерению

Основными характеристиками ЧР являются [Л. 12-12]: а) кажущийся заряд $q_{ч.р.}$; б) частота следования (среднее число ЧР в 1 с) $n_{ч.р.}$; в) средний ток ЧР

$$I_{ч.р.} = \sum_{i=0}^n \frac{|q_{i+1}| + |q_i|}{2} (n_{i+1} - n_i) \approx q_{ч.р.} n_{ч.р.} \epsilon p,$$

где q_i — i -й уровень ЧР; n_i — число ЧР в 1 с, кажущийся заряд которых превышает i -й уровень (значению $i=0$ соответствует $n_i=0$); г) энергия ЧР $W_{ч.р.} \approx q_{ч.р.} U_m$; д) средняя мощность ЧР

$$P_{ч.р.} = W_{ч.р.} n_{ч.р.} \epsilon p \approx I_{ч.р.} U_m,$$

где U_m — амплитуда напряжения, приложенного к конденсатору.

При испытании конденсаторов непосредственно измеряются кажущийся заряд $q_{ч.р.}$ и частота следования ЧР. Средний ток $I_{ч.р.}$, средняя мощность $P_{ч.р.}$ могут определяться либо непосредственными измерениями, либо расчетным путем. Энергия единичного ЧР определяется расчетным путем.

Измерения характеристик ЧР производятся для достижения одной или нескольких целей: а) установить, что в изоляции испытуемого конденсатора отсутствуют ЧР, измеряемые характеристики которых превышают нормированные значения при нормированном напряжении; б) определить напряжение возникновения и погасания ЧР; в) установить, что интенсивность ЧР в изоляции испытуемого конденсатора не изменяется во время действия нормированного напряжения более, чем нормировано; г) определить интенсивность ЧР при нормированном напряжении.

Схемы измерения характеристик частичных разрядов. Для измерения характеристик ЧР наиболее широко используются схемы, позволяющие регистрировать высокочастотные колебания, возникающие в схеме при ЧР в изоляции. Основные варианты схем для измерения характеристик ЧР приведены на рис. 12-2. В состав каждой из этих схем входят: источник регулируемого высокого напряжения (испытательный трансформатор), испытуемый объект S_x ; соединительный конденсатор C_0 , служащий для создания пути замыкания импульсов тока ЧР; измерительный элемент z ; измерительное устройство, подключаемое параллельно измерительному элементу и состоящее из фильтра верхних частот Φ , широкополосного или резонансного (узкополосного) усилителя $У$, индикаторного устройства (электронного осциллографа ЭО) и счетчика импульсов $С$. Между источником высокого напряжения и остальной частью схемы в большинстве случаев включается защитное сопротивление R_z или фильтр для подавления внешних помех.

На рис. 12-2,а приведена схема с включением измерительного элемента в ветвь заземления испытуемого объекта, на рис. 12-2,б — схема с включением измерительного элемента в ветвь заземления соединительного конденсатора и на рис. 12-2,в — мостовая схема.

Источник регулируемого высокого напряжения и соединительный конденсатор не должны иметь ЧР, мешающих измерениям характеристик ЧР в испытуемом конденсаторе. Измерительный элемент z может представлять собой активное сопротивление или катушку индуктивности. В мостовой схеме (рис. 12-2,в) рекомен-

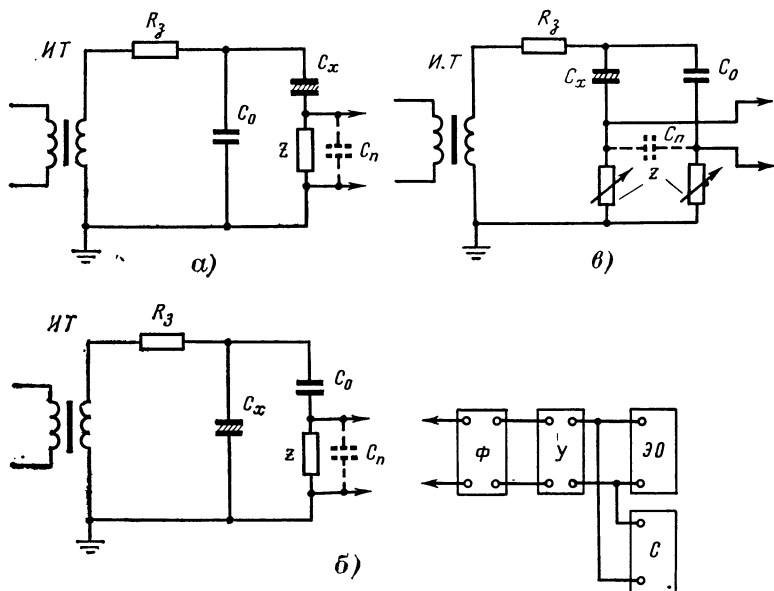


Рис. 12-2. Схемы установки для измерения характеристик ЧР.

ИТ — испытательный трансформатор; R_z — защитное сопротивление; C_0 — соединительная емкость; C_x — емкость испытуемого объекта; $C_{п}$ — паразитная емкость входа регистрирующего устройства; z — измерительный элемент; Φ — фильтр верхних частот; $У$ — усилитель; $ЭО$ — электронный осциллограф; $С$ — счетчик импульсов.

дуется применять измерительный элемент, состоящий из двух регулируемых малоиндуктивных активных сопротивлений. Активное сопротивление рекомендуется использовать при применении широкополосного измерительного устройства; катушку индуктивности — при применении узкополосного измерительного устройства. Между измерительным элементом и входом измерительного устройства в ряде случаев целесообразно включение согласующего трансформатора.

При возникновении в изоляции ЧР напряжение на емкости C_x испытуемого образца скачком уменьшается на ΔU_x :

$$\Delta U_x = q_{ч.р} / C_x. \quad (12-5)$$

Для определения импульса напряжения, возникающего на входе измерительного устройства, удобно пользоваться схемой замещения испытательной установки, в которой участвуют емкости отдельных ее элементов, а источник ЧР заменен генератором скачкообразных импульсов, соединенным последовательно с исследуемым образцом. При этом для всех перечисленных выше вариантов схем может быть использована эквивалентная схема, приведенная на рис. 12-3, в которой источник ЧР заменен генератором импульсов, соединенным последовательно с испытуемым конденсатором.

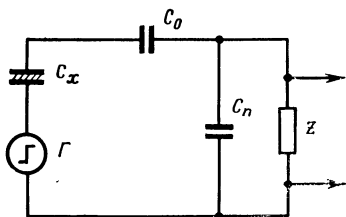


Рис. 12-3. Эквивалентная схема установки для измерения характеристик для ЧР.

G — генератор импульсов, эквивалентирующий источник ЧР; C_x — емкость испытуемого объекта; C_0 — соединительная емкость; C_n — паразитная емкость входа измерительного устройства; Z — измерительный элемент.

В первый момент времени напряжение в схеме будет распределяться обратно пропорционально емкостям и импульс напряжения, возникающий в первый момент на входе измерительного устройства, равен [Л. 12-5, 12-6]:

$$\Delta U_{\text{вх}0} = \Delta U_x \frac{1/C_n}{1/C_n + 1/C_x + 1/C_0} = \frac{q_{\text{ч.р}}}{C_x + C_n + C_n C_x / C_0}. \quad (12-6)$$

Из (12-6) видно, что для того, чтобы получить максимальное значение $\Delta U_{\text{вх}0}$, необходимо паразитную емкость C_n входа усилителя сделать возможно малой: $C_n \ll C_0$; $C_n \ll C_x$. При этом $U_{\text{вх}0} \approx \Delta U_x$.

Оценим параметры измерительного устройства для обеспечения наибольшей чувствительности схемы. Если на входе усилителя включено активное сопротивление R , то сигнал на входе имеет форму экспоненты (рис. 12-4,а):

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}0} e^{-\alpha t}, \quad (12-7)$$

где $\alpha = 1/\tau$; $\tau = RC_э$ — постоянная времени схемы; $C_э = C_n + C_x C_0 / (C_x + C_0)$ — эквивалентная емкость схемы относительно входа измерительного устройства (рис. 12-3). Частотный спектр указанного сигнала определяется выражением:

$$S(\omega) = \int_0^{\infty} \Delta U_{\text{вх}0} e^{-(\alpha + j\omega)t} dt = \frac{\Delta U_{\text{вх}0}}{\alpha + j\omega} \quad (12-8)$$

и модуль спектра

$$\Phi(\omega) = |S(\omega)| = \Delta U_{\text{вх}0} / \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}. \quad (12-9)$$

Общая энергия входного сигнала по теореме Рейли для рассматриваемого случая равна:

$$W = \frac{K}{\pi} \int_0^{\infty} \Phi^2(\omega) d\omega = \frac{K}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Delta U_{\text{вх}0}^2}{\alpha^2 + \omega^2} d\omega = \frac{K \Delta U_{\text{вх}0}^2}{2\alpha}, \quad (12-10)$$

где K — коэффициент пропорциональности, равный в данном случае $1/R$.

Найдем энергию, которая передается при полосе пропускания $\omega_1 - \omega_2$:

$$W_{\Delta\omega} = \frac{K}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\Delta U_{BX0}^2}{\alpha^2 + \omega^2} d\omega = \frac{K \Delta U_{BX0}^2}{\pi \alpha} \left(\operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\alpha} - \operatorname{arctg} \frac{\omega_1}{\alpha} \right). \quad (12-11)$$

Часть энергии выходного сигнала по отношению к общей энергии входного сигнала определится соотношением

$$\Delta W = \frac{W_{\Delta\omega}}{W} = \frac{2}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\alpha} - \operatorname{arctg} \frac{\omega_1}{\alpha} \right). \quad (12-12)$$

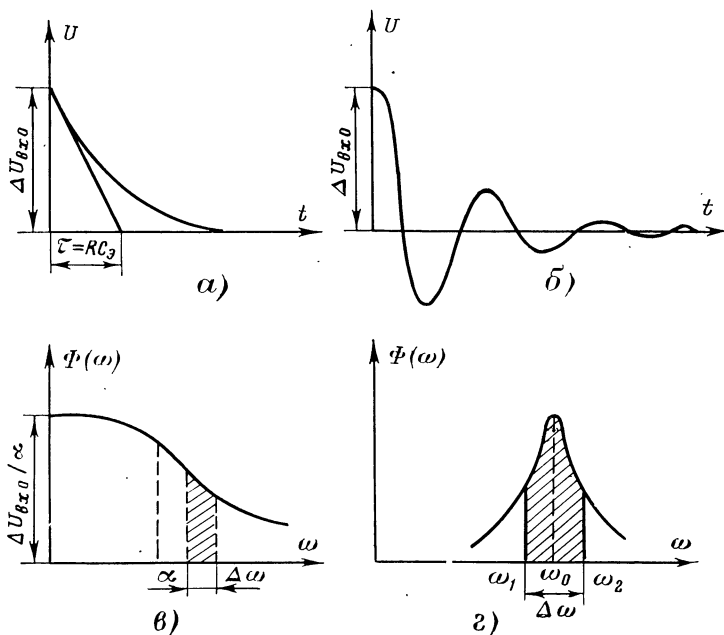


Рис. 12-4. Сигналы на входе усилителя и их спектры.

а — сигнал $\Delta U_{BX} = \Delta U_{BX0} \exp(-\alpha t)$; б — сигнал $\Delta U_{BX} = \Delta U_{BX0} \exp(-\alpha t) \times \cos \omega_0 t - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t$; в — спектр сигнала а; г — спектр сигнала б.

Если нижняя частота полосы пропускания равняется нулю или $\omega_1 \ll \omega_2$, т. е. используется широкополосный усилитель, то

$$\omega_2 = \alpha \operatorname{tg} (\pi \Delta W / 2), \quad (12-13)$$

где ΔW — часть общей энергии сигнала, которая используется на выходе.

При условии передачи 90% энергии входного сигнала, когда обеспечивается достаточно высокая чувствительность схемы, верхняя частота полосы пропускания должна быть равна:

$$f_2 = \omega_2 / 2\pi = 0,98\alpha \approx 1 / RC_0. \quad (12-14)$$

Например, при $C_0 = 10\,000$ пФ и $R = 1000$ Ом для использования 90% энергии входного сигнала требуется широкополосный усилитель с верхней частотой полосы пропускания $f_2 = 0,1$ МГц.

При применении узкополосного (резонансного) усилителя при $z = R$ передается лишь малая часть общей энергии входного сигнала, что приводит к низкой чувствительности схемы.

Если на входе индукторного устройства включена катушка индуктивности L , то форма входного сигнала имеет вид затухающих колебаний (рис. 12-4,б):

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх0}} e^{-\alpha t} \left(\cos \omega_0 t - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right), \quad (12-15)$$

где $\alpha = R_K / 2L$; $\omega_0 = \sqrt{1/LC_0 - \alpha^2}$; R_K — активное сопротивление катушки.

Так как обычно $\alpha^2 \ll 1/LC_0$, то $\omega_0 \approx 1/\sqrt{LC_0}$. Спектр этого сигнала определяется выражением

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \Delta U_{\text{вх0}} \int_0^{\infty} e^{-(\alpha + j\omega)t} \left(\cos \omega_0 t - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) dt = \\ &= \frac{j\omega \Delta U_{\text{вх0}}}{\alpha^2 + \omega_0^2 - \omega^2 + 2j\omega\alpha}, \end{aligned} \quad (12-16)$$

а модуль этого спектра — выражением

$$|S(\omega)| = \omega \Delta U_{\text{вх0}} / \sqrt{(\alpha^2 + \omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}. \quad (12-17)$$

В данном случае основная часть энергии входного сигнала сосредоточена в относительно узкой полосе вблизи частоты ω_0 (рис. 12-4,в). При этом наиболее целесообразно применение усилителя с относительно узкой полосой пропускания, настроенного на частоту ω_0 .

Энергия, передаваемая усилителем с полосой пропускания $\Delta\omega$, равна:

$$\Delta W = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{\Delta\omega}{2\alpha}, \quad (12-18)$$

и для передачи 90% энергии импульса требуется усилитель с полосой пропускания

$$\Delta f \approx 2\alpha = R_K / L. \quad (12-19)$$

Обычно Δf принимается равным 8—10 кГц.

При исследовании ЧР в конденсаторах высокого напряжения возникают серьезные затруднения вследствие появления помех в схеме (главным образом ЧР в высоковольтном испытательном трансформаторе и конденсаторе связи) и внешней короны на элементах схемы.

Надежная регистрация ЧР в исследуемых образцах требует отсутствия в схеме внутренних ЧР и внешней короны. Регистрация зарядов на уровне 10^{-14} Кл требует дополнительной экранировки от посторонних внешних помех (радиопомех и помех из сети).

Внешняя корона и внутренние разряды в исследуемом объекте обладают практически одинаковыми спектрами, поэтому их разделение вызывает значительные трудности.

В ряде случаев возможно различить виды ЧР по форме регистрируемых колебаний. Так, например, высокочастотные колебания от короны в воздухе имеют резко выраженный полярный эффект (различие по форме и интенсивности явления на положительном и отрицательном полупериодах приложенного напряжения). Для огра-

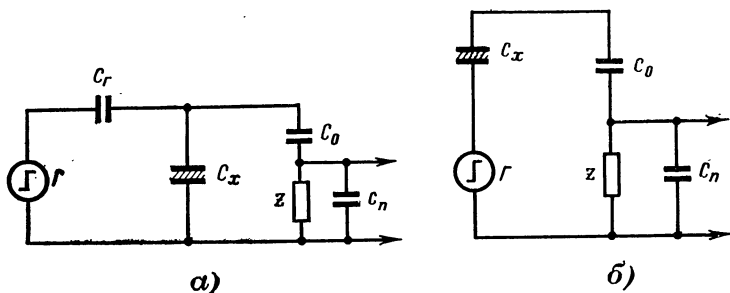


Рис. 12-5. Схемы градуировки установки измерения характеристик для ЧР.

a — параллельная схема; *б* — последовательная схема.

ничения мешающих влияний короны и помех в схеме возможны следующие пути: а) установка фильтров на стороне высокого напряжения; б) компенсация мешающих влияний посредством мостовых схем; в) применение резонансных усилителей. Во втором случае (рис. 12-2,б), изменяя соотношение плеч сопротивления моста, удастся добиться компенсации падения напряжения от высокочастотных колебаний внешних помех, которые, замыкаясь через емкости C_0 и C_x , создают встречное падение напряжения на плечах данного сопротивления. Последний случай — применение резонансных усилителей — целесообразен при наличии помехи, имеющей ограниченный спектр частот. В этом случае частота настройки усилителя выбирается отличной от частоты помехи, что чаще всего устанавливается экспериментально по минимуму сигнала от помех.

Градуировка схем измерения характеристик частичных разрядов. Градуировка может производиться по одной из схем, изображенных на рис. 12-5. По схеме рис. 12-5,а генератор Γ прямоугольных импульсов, имитирующих ЧР, включается в цепь параллельно с испытуемым объектом C_x , через небольшую емкость C_r , причем $C_r \ll C_x$ и $C_r \ll C_0$.

Если импульсы генератора ΔU_r создают такое же входное напряжение, как и импульсы ЧР, приводящие к изменению напряжения на емкости C_x , равное $\Delta U_{xг}$, то выполняется условие.

$$\Delta U_{xг} = \Delta U_r C_r / C_x \quad (12-20)$$

и кажущийся заряд от градуировочного импульса равен:

$$q_{\Gamma} = \Delta U_{\text{хГ}} C_{\text{х}} = \Delta U_{\Gamma} C_{\Gamma}. \quad (12-21)$$

Зная отклонение луча на экране осциллографа при заданном q_{Γ} , можно определить чувствительность схемы по кажущемуся заряду.

По второй схеме (рис. 12-5,б) генератор Γ включается последовательно с испытуемым объектом $C_{\text{х}}$.

В этом случае

$$\Delta U_{\text{хГ}} = \Delta U_{\Gamma} \quad (12-22)$$

и

$$q_{\Gamma} = q_{\text{хГ}} = \Delta U_{\Gamma} C_{\text{х}}. \quad (12-23)$$

При проведении градуировки схемы следует обращать внимание на четкую фиксацию двух импульсов на экране осциллографа (от фронта и среза импульса генератора). Для этого необходимо, чтобы длительность импульса τ_{Γ} генератора (интервал времени между фронтом и срезом) должна быть существенно больше эквивалентной постоянной времени контура

$$\tau_{\Gamma} \gg \tau_{\text{э}} = RC_{\text{э}},$$

где

$$C_{\text{э}} = C_{\Pi} + C_{\text{х}} C_0 / (C_{\text{х}} + C_0), \quad (12-24)$$

а также существенно больше, чем период верхней полосы пропускания усилителя

$$\tau_{\Gamma} \gg 1/f_{\text{макс}}.$$

Предельная чувствительность схемы регистрации и ее зависимость от емкости конденсатора. Предельная чувствительность схемы ограничивается шумами усилителя и шумами высоковольтной цепи (контурные шумы). В [Л. 12-7] показано, что при ограничении чувствительности схемы шумами усилителя минимальный регистрируемый заряд составляет:

$$q_{\text{ч.р.мин}} = \frac{2U_{\text{ш.у}}}{K_{\text{пер}}} C_{\text{сх}}, \quad (12-25)$$

где $U_{\text{ш.у}}$ — амплитуда напряжения шумов усилителя, отнесенная ко входу усилителя:

$$C_{\text{сх}} = C_{\text{х}} + C_{\Pi} + C_{\Pi} C_{\text{х}} / C_0; \quad (12-26)$$

$K_{\text{пер}}$ — коэффициент, характеризующий передаточную функцию усилителя и равный отношению амплитуды выходного сигнала, уменьшенной в k раз (k — коэффициент усиления усилителя для того момента времени, когда выходное напряжение достигает максимума), к амплитуде входного сигнала.

Для широкополосного усилителя при условии оптимального соотношения сигнал/шум $K_{\text{пер}} = 0,38$. Тогда при $C_{\Pi} \ll C_{\text{х}}$, $C_{\Pi} \ll C_0$ и $C_0 \approx C_{\text{х}}$ минимальный регистрируемый заряд

$$q_{\text{ч.р.мин}} \approx 2U_{\text{ш.у}} C_{\text{х}} / K_{\text{пер}}. \quad (12-27)$$

Таким образом, при ограничении чувствительности схемы шумами усилителя минимальный регистрируемый заряд возрастает приблизительно пропорционально емкости испытуемого конденсатора.

При емкостях испытуемого конденсатора более 1000 пФ амплитудное значение напряжения контурных шумов $U_{ш.к}$ на входном сопротивлении z меньше $U_{ш.у}$. Это позволяет дополнительно усилить сигнал ЧР, применяя входной трансформатор (рис. 12-6), коэффициент трансформации $K_{тр}$ которого выбирается из условия $U_{ш.к} \approx U_{ш.у}$.

При использовании входного трансформатора минимальный регистрируемый заряд

$$q_{ч.р.мин} = \frac{7}{K_{пер}} V \overline{kTC_{сх}} (n+1), \quad (12-28)$$

где $n = C_x/C_0$; k — постоянная Больцмана.

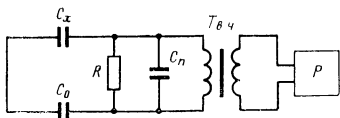


Рис. 12-6. Схема измерения характеристик ЧР с входным высокочастотным трансформатором $T_{в.ч.}$

P — регистрирующее устройство;
 R — входное сопротивление (остальные обозначения — см. рис. 12-2).

При $C_n \ll C_x$, $C_n \ll C_0$, $C_0 \approx C_x$ и $T = 290$ К минимальный регистрируемый заряд, пКл,

$$q_{ч.р.мин} = 4 \cdot 10^{-4} \frac{V \overline{n+1}}{K_{пер}} V \overline{C_{сх}} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{K_{пер}} V \overline{C_x}, \quad (12-29)$$

где C_x — в пФ.

Из (12-29) следует, что если чувствительность схемы ограничена контурными шумами, то минимальный регистрируемый заряд возрастает приблизительно пропорционально $V \overline{C_x}$. Зависимости минимального регистрируемого заряда от емкости $C_{сх} = C_x + C_n + C_0$ для обоих рассмотренных случаев приведены на рис. 12-7 [Л. 12-7]. Как следует из рис. 12-7, применение входного трансформатора позволяет существенно повысить чувствительность регистрирующей схемы при больших емкостях испытуемых конденсаторов.

Коэффициент трансформации входного трансформатора $K_{тр}$, выбранный из условия $U_{ш.к} = U_{ш.у}$, может быть определен по формуле

$$K_{тр} = \frac{U_{ш.у}}{2,5 V \overline{kT(n+1)/C_{сх}}} = \frac{U_{ш.у}}{2,5 V \overline{kT/C_0}}. \quad (12-30)$$

Например, при $U_{ш.у} = 10$ мкВ, $T = 290$ К и $C_x \approx C_0$

$$K_{тр} = 0,06 V \overline{C_0} \quad (C_0 — в пФ). \quad (12-31)$$

Для резонансного (узкополосного) усилителя и индуктивности на входе регистрирующей схемы остаются справедливыми (12-28)

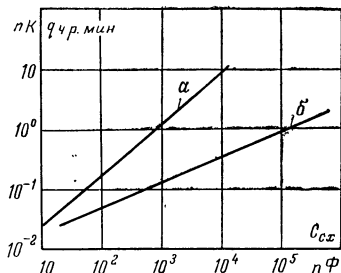


Рис. 12-7. Зависимость минимального регистрируемого заряда $q_{ч.р.мин}$ от емкости $C_{сх}$. a — при ограничении чувствительности шумами усилителя; b — при ограничении чувствительности шумами схемы.

или (12-29), в которых $K_{\text{пер}}$ является коэффициентом, характеризующим передаточную функцию резонансного усилителя. Зависимость $K_{\text{пер}}$ от ширины полосы пропускания резонансного усилителя приведена на рис. 12-8 [Л. 12-7].

Из (12-28) видно, что для увеличения чувствительности схемы параметр $n = C_x/C_0$ необходимо сделать возможно меньшим. Этого можно добиться, используя достаточно большие соединительные емкости C_0 . Целесообразное значение C_0 определяется соотношением $C_0 \approx C_x$, при этом $n \approx 1$. При малых значениях C_0 имеем $n \gg 1$ и $n+1 \approx n$. Тогда при $C_n \ll C_x$

$$q_{\text{ч.р. мин}} = \frac{4 \cdot 10^4}{K_{\text{пер}}} \frac{C_x}{C_0} \sqrt{C_0 + C_n}. \quad (12-32)$$

Таким образом, при малых значениях C_0 минимальный регистрируемый заряд растет пропорционально емкости образца C_x и нет выигрыша по сравнению со случаем, когда чувствительность схемы ограничивается шумами усилителя. Современные регистрато-

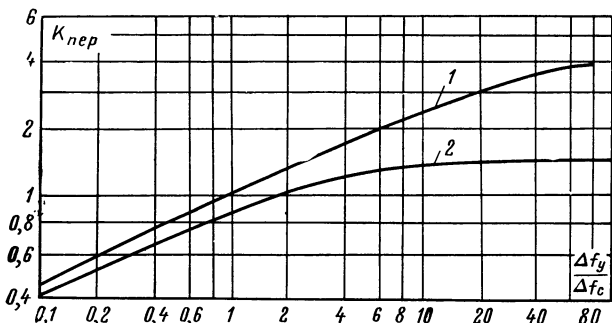


Рис. 12-8. Зависимость $K_{\text{пер}}$ от ширины полосы пропускания резонансного усилителя Δf_y и ширины спектра сигнала Δf_c .

1 — входное сопротивление — контур LCR; 2 — входное сопротивление — полосовой фильтр.

ры позволяют регистрировать ЧР с амплитудой 10 пКл на выводах конденсатора емкостью до 200 мкФ [Л. 4-10]. При емкости образцов изоляции около 100 пФ регистрируются ЧР с амплитудой порядка 10^{-14} Кл [Л. 4-1].

Чувствительность схем регистрации ЧР в зависимости от схемы соединения секций в конденсаторе. Рассмотрим влияние схемы соединения секций на чувствительность схемы регистрации ЧР (рис. 12-9) [Л. 2-19]. Если кажущийся заряд частичного разряда в секции емкостью C_c , отнесенный к выводам секции, равен q_c , то соответствующее ему изменение напряжения секции равно $\Delta U_c = q_c/C_c$. Тогда скачок напряжения на входе регистрирующей схемы в начальный момент времени составит:

$$\Delta U_{\text{вх01}} = \Delta U_c \frac{C_c C_0}{m C_n C_0 + n C_c C_n + n C_c C_0} = \frac{q_c C_0}{m C_n C_0 + n C_c C_n + n C_c C_0}, \quad (12-33)$$

где n — число параллельно соединенных секций в группе; m — число секций или групп, соединенных последовательно.

При кажущемся заряде ЧР в конденсаторе (отнесенного к выводам конденсатора), равном q_k , соответствующее ему изменение напряжения конденсатора равно $\Delta U_k = q_k / C_k$, где $C_k = C_c n / m$. В этом случае скачок напряжения на входе регистрирующей схемы в начальный момент времени равен:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{вх}02} &= \Delta U_k \frac{C_k C_0}{C_{\text{п}} C_0 + C_k C_{\text{п}} + C_k C_0} = \\ &= \Delta U_k \frac{n C_c C_0}{m C_{\text{п}} C_0 + n C_c C_{\text{п}} + n C_c C_0} = \frac{m q_k C_0}{m C_{\text{п}} C_0 + n C_c C_{\text{п}} + n C_c C_0}. \end{aligned} \quad (12-34)$$

При равенстве входных напряжений в первом и во втором случае ($\Delta U_{\text{вх}01} = \Delta U_{\text{вх}02}$) из (4-82) и (4-83) имеем:

$$q_c = m q_k. \quad (12-35)$$

Из (12-35) следует, что одинаковые напряжения на входе регистрирующих устройств возникают в том случае, когда кажущийся заряд на выводах секции в m раз больше кажущегося заряда на выводах конденсатора. Так как чувствительность схемы определяется по кажущемуся заряду на выводах конденсатора, то при заданной чувствительности реальная чувствительность схемы регистрации к ЧР в секции падает обратно пропорционально числу последовательно соединенных секций [Л. 2-19].

При $C_{\text{п}} \ll C_0$ и $C_{\text{п}} \ll C_c$ в соответствии с (12-33) имеем:

$$\Delta U_{\text{вх}01} = q_c / n C_c. \quad (12-36)$$

Из (12-36) следует, что входное напряжение уменьшается обратно пропорционально числу секций n , соединенных параллельно, что приводит к уменьшению чувствительности схемы регистрации обратно пропорционально числу параллельно соединенных секций n .

Таким образом, чувствительность регистрирующих схем по отношению к кажущемуся заряду, отнесенному к выводам секции, уменьшается, если секции в конденсаторе соединены параллельно или последовательно.

При минимальном регистрируемом заряде 10—60 пКл это соответствует 100—700 пКл для одной секции в низковольтных конденсаторах (параллельное соединение секций) и 300—500 пКл для высоковольтных конденсаторов в зависимости от числа секций, соединенных последовательно, и емкости секций.

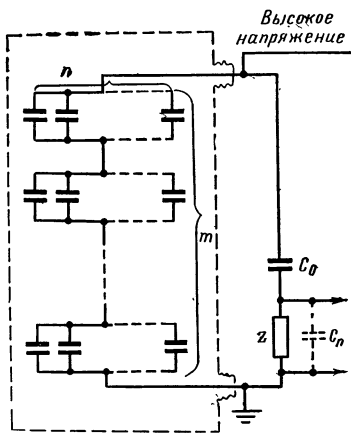


Рис. 12-9. Влияние схемы соединения секций на измерении ЧР в конденсаторе.

Влияние индуктивности контура и внутренней индуктивности конденсатора на результаты измерения характеристик частичных разрядов. Индуктивность контура зависит от индуктивности испытуемого и соединительного конденсаторов. В силовых конденсаторах индуктивность секций обычно значительно меньше индуктивности соединительных элементов. Поэтому индуктивность конденсатора в этом случае определяется индуктивностью соединительных элементов (выводы секций, соединительные шины) и выводов конденсатора.

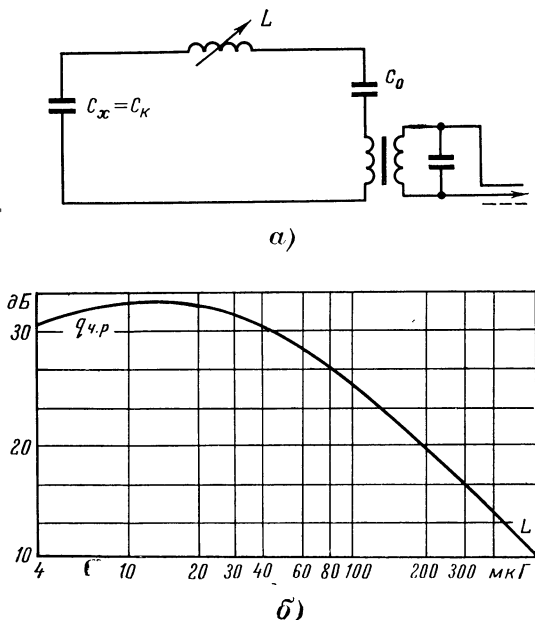


Рис. 12-10. Влияние индуктивности контура L на измеряемый кажущийся частичный заряд $q_{ч.р.}$.

a — схема измерения; b — зависимость $q_{ч.р.} = f(L)$, $C_K = 1 \text{ мкФ}$, $C_0 \approx 0,5 C_K$.

В [Л. 12-9] было отмечено, что если конденсатор имеет резонансную частоту ниже верхней частоты полосы усилителя, то за счет резонансных явлений могут возникнуть ошибки в измерениях характеристик ЧР. В этом случае происходит завышение измеряемого кажущегося заряда ЧР. В [Л. 2-19] приводится зависимость влияния индуктивности контура на результаты измерения характеристик ЧР (рис. 12-10). При измерениях использовался резонансный усилитель, настроенный на частоту $f_p = 28 \text{ кГц}$, и выходной усилитель, настроенный на частоту 100 Гц , с квадратичным прибором на выходе, дающим отсчет в децибелах. Градуировка прибора производилась подключением к выводам конденсатора генератора, который создавал разряды с интенсивностью $50\text{—}5000 \text{ пКл}$ с частото-

той 100 имп/с. При этом устанавливалась связь между разрядом, пКл, и отсчетом прибора для измерения квадратичного параметра на выходе.

Как следует из кривой рис. 12-10, чувствительность схемы падает, если индуктивность в измерительном контуре превышает 50 мкГ при емкости конденсатора $C_k = 1$ мкФ и фильтровой емкости $C_0 = 0,5C_k$ (резонансная частота контура 40 кГц).

Примеры устройств для измерения характеристик ЧР в силовых конденсаторах. Для регистрации ЧР в силовых конденсаторах в Советском Союзе применяются измерительные устройства, содержащие либо широкополосный усилитель с полосой пропускания 10—150 кГц, либо узкополосный усилитель, настроенный на частоту, лежащую в пределах от 10 кГц до собственной резонансной частоты конденсатора. В качестве индикаторного устройства используется осциллограф. Счетчик импульсов имеет разрешающее время до 10 мкс. Минимальный регистрируемый заряд составляет не более 1 пКл при емкости конденсатора до 1 мкФ.

Французская фирма EDF [Л. 4-10, 2-19] использует измерительное устройство, содержащее два усилителя: входной, настроенный на 28 кГц, и выходной, настроенный на 100 Гц. Испытательное напряжение подается через реактивность, настроенную в резонанс с конденсатором. Схема соединения приведена на рис. 12-10. Импульсы ЧР подаются на усилитель через трансформатор с заземленной средней точкой. Устройство позволяет регистрировать ЧР выше 10 пКл с частотой повторения 100 имп/с на выводах конденсатора мощностью 20—100 квар. Устройство позволяет получить интегральное значение кажущегося заряда ЧР за короткий отрезок времени, выраженный в децибелах по отношению к определенному уровню. Используется визуальное наблюдение за расположением разрядов во времени для отстройки от внешних помех.

Английская фирма ERA [Л. 4-10] применяет схему рис. 12-2,а с широкополосным усилителем, имеющим полосу 10—150 кГц и разрешающее время 30 мкс. Максимальный регистрируемый заряд менее 10 пКл до емкостей 250 мкФ. Максимальная мощность конденсаторов 150 квар.

В Голландии [Л. 2-19, 4-10] применяются устройства, использующие как прямой (рис. 12-2,а, б), так и мостовой (рис. 12-2,в) методы измерения с широкополосным усилителем, имеющим полосу 10—150 кГц, разрешающее время 2 мкс. Минимальный регистрируемый заряд равен 10 пКл для конденсаторов до 20 мкФ.

Методика измерения характеристик частичных разрядов. Согласно рекомендациям МЭК [Л. 12-1] испытания, при которых измеряются характеристики ЧР, проводятся при $25 \pm 10^\circ\text{C}$. В процессе испытания сначала прикладывается номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ и выдерживается до достижения термического равновесия. Затем выбранное напряжение $U_{\text{пер}}$ (по условиям возникновения перенапряжений в эксплуатации) прикладывается 1 раз в течение 1 с и затем снижается до $1,2 U_{\text{ном}}$ и выдерживается в течение 10 мин, после чего напряжение повышается до $1,5 U_{\text{ном}}$ и выдерживается еще 10 мин. При этом не должны возникнуть ЧР заданной интенсивности (50 пКл) и не должен изменяться уровень ЧР.

Конденсаторы продольной компенсации линий электропередачи [Л. 12-10], кроме этого испытания, заряжаются от источника постоянного напряжения до напряжения, равного амплитуде ожидаемых перенапряжений $\sqrt{2}U_{\text{пер}}$, и разряжаются на заданный контур.

Разряды повторяются 50 раз с интервалами 5 с. Затем прикладывается напряжение $1,2 U_{\text{ном}}$ в течение 10 мин и $1,5 U_{\text{ном}}$ в течение 10 мин. При этом не должно быть изменения уровня ЧР.

В проекте Британского стандарта [Л. 4-10] для силовых конденсаторов предусматриваются испытания напряжением $2 U_{\text{ном}}$ в течение 1 с, после чего прикладывается напряжение $1,2 U_{\text{ном}}$ в течение 10 мин и $1,5 U_{\text{ном}}$ в течение 10 мин; при последнем испытании не должно быть устойчивых ЧР с амплитудой $5 \cdot 10^{-9} C_K^{0,5}$ Кл, где C_K — емкость конденсатора, мкФ.

Британский стандарт [Л. 12-11] содержит испытания на ЧР, в процессе которых к конденсатору прикладывается напряжение $3 U_{\text{ном}}$ в течение 1 с, затем $1,2 U_{\text{ном}}$ в течение 10 мин и $1,5 U_{\text{ном}}$ в течение 10 мин. При последнем напряжении не должно быть ЧР на уровне 60 пКл.

12.4. ИСПЫТАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Испытания импульсных конденсаторов включают в себя проверку повышенным испытательным напряжением, измерение электрических характеристик конденсатора (например, таких как емкость, индуктивность, $\text{tg } \delta$ и т. п.) и оценку их динамических свойств.

Измерение емкости, $\text{tg } \delta$, индуктивности и добротности конденсаторов осуществляется на низком напряжении. Два первых измерения обычно производятся при низком напряжении (до 100 В) промышленной частоты при 20—25°C. На практике отклонения от номинальной емкости чаще всего составляют $+20 \div 10\%$. Значение $\text{tg } \delta$ измеряется для контроля технологического процесса

вакуумной сушки и пропитки и обычно должно быть не более 0,0045 для бумажно-масляных конденсаторов и не более 0,006 для бумажно-касторовых или бумажно-трихлордифениловых конденсаторов.

Эквивалентная индуктивность импульсного конденсатора может быть найдена путем определения первой (низшей) резонансной частоты конденсатора. Схема измерения индуктивности приведена на рис. 12-11. Принцип действия схемы состоит в определении резонансных

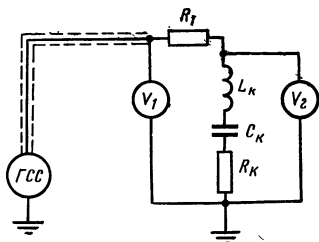


Рис. 12-11. Схема измерения индуктивности и добротности конденсатора с помощью генератора стандартных сигналов.

R_1 — ограничивающее сопротивление; V_1 и V_2 — ламповые милливольтметры; C_K — емкость конденсатора; L_K — индуктивность конденсатора; R_K — активное сопротивление конденсатора.

частот конденсатора, которые регистрируются по минимальному отклонению показаний вольтметра. В процессе измерения ламповый вольтметр должен быть присоединен непосредственно на зажимы конденсатора таким образом, чтобы в измерительный контур не входили дополнительные элементы цепи, входящие в основной контур (генератор — ограничительное сопротивление — конденсатор). Ограничительное сопротивление должно выбираться много больше эквивалентного активного сопротивления конденсатора R_k при резонансной частоте, чтобы исключить его влияние на результаты измерения. В процессе измерения необходимо учитывать, что конденсатор представляет собой цепную схему и может иметь ряд резонансных частот. Поэтому важно правильно определить нижнюю резонансную частоту конденсатора f_p , поскольку на этой частоте индуктивностью определяются время и характер разряда.

Емкость конденсатора C_k может быть определена обычными мостовыми схемами на низких частотах, так как для ряда конденсаторов (с диэлектриком из бумаги, пропитанной нефтяным конденсаторным маслом, из полиэтиленовой, полистирольной или фторопластовой пленки), за исключением конденсаторов с пропиткой хлорированным жидким диэлектриком и касторовым маслом, с изменением частоты до нескольких мегагерц емкость изменяется не более чем на 10%. Зная емкость конденсатора C_k , его индуктивность L_k легко определить по соотношению

$$L_k = 1 / (4\pi^2 f_p^2 C_k). \quad (12-37)$$

Эквивалентное активное сопротивление конденсатора R_k и его добротность Q_k могут быть определены соответственно следующими способами.

1. С помощью схемы рис. 12-11 при резонансной частоте измеряется напряжение U_1 и $U_2 = U_k$. Далее, принимая во внимание, что обычно $R_1 \gg R_k$, определяют R_k из соотношения $R_k = R_1 U_k / U_1$.

2. В контуре, замкнутом на малую индуктивность (без искрового промежутка), определяют декремент Δ_0 возбужденных в нем колебаний. При этом предполагается, что дополнительными потерями во внешней цепи контура можно пренебречь. Для этой цели используются два индуктивно связанных контура. Один из них, состоя-

щий из исследуемого конденсатора и малоиндуктивной петли, слабо связан с возбуждающим контуром, который состоит из конденсатора и катушки и обладает значительно меньшей частотой колебаний.

Анализ выражений [Л. 12-8] для токов в двух индуктивно связанных контурах, в одном из которых происходит разряд емкости C_1 , заряженной до напряжения U , показывает, что правильное определение декремента колебаний в исследуемом втором контуре возможно, если затухание колебаний второго контура не зависит от параметров первого контура. Эти требования выполняются при условиях, что: 1) частота собственных колебаний второго контура значительно выше частоты колебаний первого контура $\omega_2 \gg \omega_1$; 2) коэффициент связи весьма мал $M \ll \sqrt{L_1 L_2}$. Для соблюдения этих условий в схемах измерения в первый возбуждающий контур включается катушка с индуктивностью L_1 , значительно превышающей L_2 . Малый коэффициент связи между контурами обеспечивается малой площадью петли второго контура и соответствующим расстоянием между петлей и индуктивностью L_1 . Для определения декремента колебаний производится осциллографирование падения напряжения на внешней индуктивности второго контура с помощью осциллографа для однократной записи быстрых процессов, имеющего усилитель с достаточно широкой полосой пропускания.

Испытание конденсаторов на высоком напряжении включает:

1) испытание повышенным выпрямленным напряжением; 2) определение динамической устойчивости конденсатора при предельно допустимом токе в разрядном режиме; 3) определение добротности конденсатора (потерь в конденсаторе) в рабочем режиме; 4) измерение сопротивления изоляции.

Испытание высоким выпрямленным напряжением производится на обычных схемах выпрямления, причем испытательное напряжение обычно равно $(1,2-1,5)U_{\text{ном}}$. Нижнее значение $(1,2U_{\text{ном}})$ соответствует конденсаторам, предназначенным для работы в режиме аperiodического разряда, более высокие $[(1,2-1,5)U_{\text{ном}}]$ — в режиме колебательного разряда. Длительность испытаний составляет 1—3 мин. В процессе испытаний в ряде случаев контролируется ток утечки, измеряемый после одноминутной выдержки при рабочем напряжении. При этом сопротив-

ление изоляции конденсатора должно быть не ниже $i300 \text{ Ом} \cdot \text{Ф}$.

Определение динамической устойчивости производится испытаниями в разрядном режиме на разрядный контур, обеспечивающий протекание номинального тока конденсатора при номинальном напряжении. Обычно каждый конденсатор подвергается воздействию 20 разрядов при номинальном напряжении. В ряде случаев для конденсаторов, предназначенных для работы в ре-

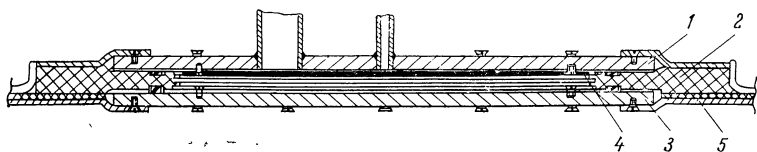


Рис. 12-12. Эскиз малоиндуктивного вакуумного разрядника.

1 — верхний электрод; 2 — камера разрядника из оргстекла; 3 — нижний электрод; 4 — экранирующий электрод; 5 — токоведущие шины.

жиме колебательных разрядов, испытания проводятся при напряжении, превышающем номинальное на 10%. Отсутствие повреждений в конденсаторе в процессе испытаний определяется по отсутствию слышимых разрядов внутри конденсатора, а также по неизменности емкости конденсатора, измеренной до и после испытаний.

Определение динамической устойчивости конденсатора и его добротности на высоком напряжении обычно связано со значительными трудностями, так как весьма сложно обеспечить достаточно малую индуктивность разрядного устройства и малые потери энергии в этом устройстве.

Хорошие результаты при таких испытаниях могут быть получены при использовании специальных малоиндуктивных вакуумных разрядников (рис. 12-12) [Л. 1-8]. Электроды разрядника на 50 кВ представляют собой два изолированных друг от друга медных диска. В качестве изоляции используется кольцо из оргстекла толщиной 10 мм. Герметизация разрядника осуществляется при помощи резиновых прокладок, расположенных в кольцевых пазах электродов. Работа разрядника обычно производится при остаточном давлении 1—5 Па. Конденсатор присоединяется к электродам разрядника либо плоскими шинами с промежуточной полиэтиленовой изоляцией, либо системой коаксиальных кабелей. Эквива-

лентное активное сопротивление разрядника зависит от протекаемого тока: при токе 100 кА оно не превосходит $5 \cdot 10^{-3}$ Ом. Индуктивность разрядника при различных конструктивных исполнениях (круглый, прямоугольный) колеблется от $2 \cdot 10^{-9}$ до $15 \cdot 10^{-9}$ Г.

Если измерение тока утечки на высоком напряжении затруднено, то производится измерение сопротивления изоляции конденсатора при постоянном напряжении (обычно при 500 В) после одноминутного приложения напряжения. В этом случае сопротивление изоляции должно быть не ниже 2000 Ом·Ф. Сопротивление изоляции конденсатора $R_{из}$ может быть определено также по саморазряду конденсатора емкостью C_k , заряженного до определенного напряжения U_0 :

$$u_c = U_0 e^{-t/\tau_k}, \quad (12-38)$$

где $\tau_k = R_{из} C_k$ — постоянная саморазряда.

При $t = \tau_k$ $u_c = U_0/e \approx 0,37 U_0$. Таким образом постоянная времени саморазряда определяется числом секунд, по истечении которых напряжение на выводах конденсатора уменьшается в e раз. Если в процессе испытания измерить напряжение на конденсаторе U_{c1} через время t_1 , то постоянная времени саморазряда равна:

$$\tau_k = t_1 / \ln \frac{U_0}{U_{c1}}.$$

Обычно определение постоянной времени саморазряда производится при зарядном напряжении, равном нескольким киловольтам.

ПРИЛОЖЕНИЕ

КОМПЛЕКТНЫЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности в распределительных сетях переменного тока промышленной частоты применяются в виде батарей, мощность, а следовательно, и размеры которых зависят от конкретных условий применения. Эти батареи потребитель должен комплектовать на месте из отдельных конденсаторных единиц, оснащать их соответствующей коммутирующей, регулирующей и защитной аппаратурой и т. п., что создает для него определенные неудобства и увеличивает расходы по монтажу и эксплуатации. С целью исключения этих неудобств заводами — изготовителями конденсаторов наряду с конденсаторами выпускаются также скомпонованные в форме отдельных конструктивных единиц батареи конденсаторов, снабженные необходимой коммутирующей, регулирующей и защитной аппаратурой, называемые комплектными конденсаторными установками (ККУ). Для пуска ККУ в эксплуатацию потребителю необходимо только подключить ее к сети.

Комплектная конденсаторная установка, представляющая собой автономную конструктивную единицу, состоит из металлической конструкции, в большинстве случаев представляющей собой закрытый металлический шкаф, в котором размещаются конденсаторы и аппаратура для присоединения ее к сети, коммутации, регулирования и защиты. По характеру работы ККУ делятся на регулируемые, в которых осуществляются непрерывное слежение за регулируемым параметром и автоматическое воздействие на него при отклонениях от заданного значения (подключением или отключением конденсаторов), нерегулируемые, не содержащие регулятора и комбинированные, содержащие регулируемую и нерегулируемую части [Л. П-1—П-2].

Параметр, по которому производится регулирование реактивной мощности ККУ, определяется потребителем и зависит от характеристик энергосистемы. Регулирование может производиться по следующим параметрам: а) по напряжению; б) по значению и направлению реактивной мощности; в) по времени суток; г) по току нагрузки; д) по коэффициенту мощности; е) по изменению температуры; ж) комбинированное регулирование производится по нескольким параметрам одновременно. Регулирование по напряжению применяется тогда, когда ставится задача поддержания напряжения на определенном уровне. Этот метод регулирования одновременно предохраняет установку от перегрузки по напряжению. При неравномерных нагрузках, когда требуется ограничивать отдачу предприятием реактивной мощности в сеть, применяется регулирование по значению и направлению реактивной мощности. На предприятиях, работающих по установившемуся или незначительно изменяющему-

ся графику, может быть применено регулирование по времени суток. Регулирование по току нагрузки применяется в том случае, когда в течение суток происходит резкое изменение полной нагрузки, сопровождающееся соответствующим изменением реактивной мощности потребителя.

В случаях, когда изменение реактивной мощности пропорционально изменению коэффициента мощности $\cos \varphi$, применяется регулирование по коэффициенту мощности.

И, наконец, регулирование по нескольким параметрам одновременно применяется тогда, когда требуется объединение нескольких видов регулирования.

При комбинированном регулировании наибольшее распространение получило регулирование по напряжению с коррекцией по току, по реактивной мощности с коррекцией по напряжению и пр. Регулирование с помощью ККУ по любому из вышеприведенных параметров ККУ может быть только ступенчатым [Л. П-2].

Проектирование ККУ начинается с выбора ее мощности и числа и мощности ступеней регулирования. Затем подбираются конденсаторы, защита, коммутирующая и регулирующая аппаратура и производится конструктивная компоновка установки. Для выбора количества ступеней регулирования используются графики нагрузки. Регулирующий эффект, т. е. изменение напряжения ΔU при включении или отключении одной ступени ККУ, можно оценить по формуле [Л. П-2]

$$\Delta U \% = QX_c / 10U^2, \quad (\text{П-1})$$

где Q — реактивная мощность ступени, квар; U — линейное напряжение сети, кВ; X_c — сопротивление ближайших к установке элементов сети, Ом.

Параметры коммутационной аппаратуры и защита ККУ выбираются по переходному процессу. Особенностью коммутации ККУ является то, что она может происходить при наличии уже включенных ранее и работающих параллельно с коммутируемой аппаратурой ступеней. Переходные процессы существенно отличаются при включении или отключении одиночного конденсатора или группы конденсаторов, когда нет параллельно включенных конденсаторов и когда таковые имеются.

Во втором случае, при наличии параллельно включенных конденсаторов, амплитуда переходного тока существенно больше, чем при коммутации одиночного конденсатора в отсутствие параллельно включенных. Напряжение на зажимах коммутационного аппарата, соединенного с конденсатором, остается неизменным в течение всего времени отключения, так как время разряда конденсатора значительно больше времени движения контактов при отключении. Напряжение на зажимах коммутационного аппарата, соединенных с сетью, изменяется синусоидально. Поэтому напряжение между подвижными и неподвижными контактами при отключении, равное нулю в момент начала отключения, достигает двойного значения через половину периода после начала движения контактов. Ток также может достигать двойного значения через половину периода после начала движения контактов. Кроме того, ток также может достигнуть двойного значения по сравнению с током включения разряженного конденсатора и может возобновляться несколько раз в течение процесса отключения, пока окончательно не будет разорван контактами.

Конструкция ККУ должна не только удовлетворять общим требованиям удобства эксплуатации, легкой доступности к любому элементу и т. п., но и обеспечивать полный отвод возникающего в конденсаторах тепла.

Таким образом, для ККУ большое значение имеют ее тепловые характеристики.

Улучшение теплоотвода может быть достигнуто применением так называемой открытой конструкции ККУ, в которой конденсаторы устанавливаются открыто, в верхней их части размещаются сравнительно небольшие металлические шкафы с коммутационно-регулирующей аппаратурой и защитой [Л. П-3]. Как и для конденсаторов, в качестве технических характеристик ККУ могут служить удельные характеристики по объему и массе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1-1. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. Л., «Энергия», 1969. 592 с.
- 1-2. Ренне В. Т. Пленочные конденсаторы с органическим диэлектриком. Л., «Энергия», 1971. 240 с.
- 1-3. Ренне В. Т., Багалец Ю. В., Фридрих И. Д. Расчет и конструирование конденсаторов. Киев, «Техника», 1966. 326 с.
- 1-4. Гулевич А. И., Киреев А. П. Производство силовых конденсаторов. М., «Высшая школа», 1969. 440 с.
- 1-5. Liebscher F., Held W. Kondensatoren. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1968. 334 S.
- 1-6. Назарова Г. Т., Единая серия косинусных конденсаторов. — В кн.: Силовое конденсаторостроение. Вып. 1. Информстандарт-электро, 1968, с. 135—140.
- 1-7. Морозов М. М. и др. Силовые конденсаторы. — В кн.: Электротехническая промышленность СССР. М., Информстандарт-электро, 1967, с. 201—216.
- 1-8. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. Под ред. В. С. Комелькова. М., Атомиздат, 1970, 472 с.
- 1-9. Мантров М. И. Расчет бумажно-масляных конденсаторов для силовых установок. Изд. МЭИ, 1960. 93 с.
- 1-10. Яманова Л. В. Силовые электрические конденсаторы, М., ВЗЭИ, 1964. 86 с.
- 1-11. Lampier W. C. Series wound capacitor. Pat. № 3093775 (США).
- 1-12. Meyer R. C. Energy storage capacitors. Pat. № 3483453 (США).
- 1-13. Медведев С. К. Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь бумажного диэлектрика. — «Электричество», 1961, № 8, с. 66—72.
- 1-14. Hoferer H. Kühlungsarten bei Leistungskondensatoren und Probleme der Temperaturüberwachung. — «Roederstein», № 12, 1966, S. 103—116.
- 1-15. Назаров Н. И. Зарубежные конденсаторы для электротермических установок. — «Электротехническая промышленность». Электротермия. Вып. 107, 1971, с. 28—31.
- 1-16. Blank E. Low inductance capacitors. Pat. № 1149984 (США).
- 1-17. Ferrante J. F. Capacitor construction. Pat. № 3024393 (США).
- 1-18. Садовников А. И., Алексеева О. Г. Графоаналитический метод расчета компенсации изменения объема жидкого диэлектрика от изменения температуры в конденсаторах. — В кн.: Силовое конденсаторостроение. М., Информстандарт-электро, 1968, с. 96—103.

2-1. **Büchner A.** Das Mischkörperproblem in der Kondensatoren-technik. — «Wiss. Veröffentl. aus. der Siemenswerke», 1939, № 2, S. 204—216.

2-2. **Багалец Ю. В.** Расчет емкости пропитанных конденсаторов. — «Известия вузов. Электромеханика», 1958, № 6, с. 101—107.

2-3. **Назаров Н. И., Переселенцев И. Ф.** Влияние коэффициента запрессовки на электрические характеристики бумажно-масляного диэлектрика. — «Вестник электропромышленности», 1960, № 6, с. 55—60.

2-4. **Варшавский Д. С.** Расчет электрических характеристик многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги. — «Электричество», 1961, № 11, с. 78—82.

2-5. **Sakamoto T., Oshida K., Joshida J., Shinoda R., Take J.** Improvement of dielectric properties of capacitor paper. CIGRE, Rep. № 133, 1962.

2-6. **Брагин С. М.** Диэлектрические характеристики (ϵ и $\operatorname{tg} \delta$) пропитанной кабельной бумаги в зависимости от свойств компонентов (бумага—масло). — «Труды II Всесоюзной конференции по электрической изоляции». М., Изд-во АН СССР, 1960, с. 97—104.

2-7. **Circular № 31 CIGRE Study Committee**, № 18, 1960.

2-8. **Медведев С. К.** О расчете электрической прочности слоистого диэлектрика конденсатора. — В кн.: Развитие силового конденсаторостроения. М., изд. ЦИНТИЭлектропром, 1962, с. 48—57.

2-9. **Preissinger H.** Die Durchschlagsfeldstärke von Isolierölen in Abhängigkeit von der Schichtdicke. — «ETZ-A», Bd 91 (1970), H. № 2, S. 118—120.

2-10. **Каталог** фирмы Tervakoski (Финляндия).

2-11. **Каталог** фирмы Bolloré (Франция).

2-12. **Балыгин И. Е.** Электрическая прочность жидких диэлектриков. М., «Энергия», 1964. 228 с.

2-13. **Милов Б. Г.** Пути совершенствования качества электроизоляционной целлюлозы для выработки конденсаторной бумаги. — В кн.: Производство конденсаторной бумаги. Киев, ГНТЛ, 1963, с. 25—41.

2-14. **Бородулина Л. К.** и др. Влияние состава древесной целлюлозы на ее диэлектрические свойства. — «Труды ЛПИ», № 276 1967, с. 3—10.

2-15. **Ренне В. Т., Морозова М. Н.** Влияние типа катиона на диэлектрические потери конденсаторной бумаги. — «ЖТФ», 1958, № 9, с. 2015—2019.

2-16. **Бородулина Л. К., Морозова М. Н., Ренне В. Т.** Влияние анионов, содержащихся в электроизоляционной бумаге на ее электрические свойства. — «Труды ЛПИ», № 276, 1967, с. 10—18.

2-17. **Каталог** фирмы Honshu-paper (Япония).

2-18. **Barry C. P.** Low loss papers for capacitor manufacture. Paper 4^b. Материалы конференции ВЕАМА. Лондон, 1970, p. 1—18.

2-19. **Power capacitors with mixed paper and polypropylene dielectric.** CIGRE, 1970, Rep. № 15-04. Auth.: D. Zanobetti, G. A. Gertsch, R. I. Hopkins, T. A. Rabanit, K. Wenzel.

2-20. **Ренне В. Т.** Применение полипропилена в качестве диэлектрика в силовых конденсаторах. — «Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы». Вып. 3, 1970, с. 17—24.

2-21. **Сканави Г. И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). М., Физматгиз, 1963. 908 с.

2-22. **Cox E. B.** Capacitors with poliolefin dielectric (GE. Co). Pat. № 3363156 (США).

2-23. **Kaniskin V. A., Tran H. T., Shen M.**, Dielectric properties of trichlordyphen impregnated polypropylene film. — «Insulation/Circuit», May 1972, № 5, p. 37—41.

2-24. **Eustance J. W., Solberg W. O.** Polypropylene film improves power capacitors. — «Insulation/Circuit», May 1970, № 5, p. 43—46.

2-25. **Липштейн Р. А., Шахнович М. И.** Трансформаторное масло. М., «Энергия», 1968. 352 с.

2-26. **Кларк А., Рейнольдс Е.** Влияние химического состава масла на его газостойкость в электрическом поле. — «Dielectrics», 1963, vol. II, № 1, p. 26—44.

2-27. **Кучинский Г. С.** Выбор допустимых рабочих напряженностей в бумажно-масляной конденсаторной изоляции по характеристикам частичных разрядов. — В кн.: Некоторые вопросы силового конденсаторостроения. М., Информстандартэлектро, 1967, с. 46—60.

2-28. **Гроссман О. И., Ойдрам Р. А.** Новая методика определения газостойкости изоляционных масел. — «Труды Таллинского политехнич. ин-та, сер. А», № 305, 1971, с. 67—74.

2-29. **Ренне В. Т. и Цюй-Си-Синь.** Влияние боковых цепей в ароматических соединениях на поведение нефтяного масла в электрическом поле. — «ЖТФ», т. XXVIII, вып. 7, 1957.

2-30. **Андрианов К. А., Скипетров В. В.** Синтетические жидкие диэлектрики. М., Госэнергоиздат, 1962. 176 с.

2-31. **Назаров Н. И., Калашникова О. А.** Температурные характеристики пропитывающих диэлектриков для силовых конденсаторов. — «Изв. вузов. Энергетика», 1971, 8, с. 42—46.

2-32. **Ямаути И., Томаго А.** — «Electrotechn. J. Japan», 1963, vol. 8, № 3, 4, p. 103—108.

2-33. **Bourdon K.** — «Electricien», 1966, vol. 94, № 2069, p. 30—36.

2-34. **Шахнович М. И.** Синтетические жидкости для электротехнических аппаратов. М., «Энергия», 1972, 200 с.

2-35. **Boyer P.** Leistungssteigerung der mit Askarels imprägnierten Kondensatoren mittels geeigneter Zusätze. — «Bull. Schweiz. elektrotechn. Vereins», 1969, № 117, S. 767—776.

2-36. **Яманов С. А., Буканов И. В.** Применение масел для пропитки бумажных конденсаторов. М., изд. Бюро технической информации Министерства промышленности средств связи СССР, 1948. 46 с.

2-37. **Полиорганосилоксановые жидкие диэлектрики (проспект), ВДНХ СССР.** М., «Химия», 1967.

2-38. **Полихлор (фтор) органосилоксановые жидкости (проспект), ВДНХ СССР.** М., «Химия», 1967.

2-39. **Ромашков Р. Г., Рашковская Н. Б.** Исследование процесса сушки под вакуумом. — «Химическая промышленность», 1951, № 12, с. 43—45.

2-40. **Третьяков В. М., Лямин Г. Н.** О глубоковакуумной сушке кабелей высокого напряжения. — «Электротехника», 1972, № 3, с. 57—59.

2-41. **Бухгольц Х.** Влияние содержания газа на диэлектрические свойства изоляционных масел. — «ETZ», H.22, 1954.

2-42. **Вишоу В.** Измерение воздухопоглощения масла. Сборник научно-исследовательских работ электромеханического факультета ЛПИ им. М. И. Калинина, 1956, с. 22—30.

2-43. **Clophen im Kondensatorenbau.** Prosp. Fa Bayer (ФРГ), 1969.

3-1. **Каплан Д. А.** Краевой эффект в изоляции конденсаторного типа. — «Изв. вузов. Энергетика», 1961, № 4, с. 30—36.

3-2. **Грейсух М. А., Кучинский Г. С., Каплан Д. А., Мессерман Г. Т.** Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 300 с.

3-3. **Voag J. W.** The design of the electric field in van de Graaf generator. — «Journ. IEE», vol. 102, 1954, p. 63.

3-4. **Круг К. А.** Основы электротехники. Т. 1. М., Госэнергоиздат, 1946. 472 с.

3-5. **Назаров Н. И.** О влиянии коэффициента запрессовки на электрическую прочность силового конденсатора. — «Электричество», 1969, № 8, с. 89—90.

3-6. **Назаров Н. И.** Влияние коэффициента запрессовки на кратковременную электрическую прочность силового конденсатора. — «Электричество», 1968, № 1, с. 51—54.

3-7. **Назаров Н. И.** Об электрической прочности слоистого конденсаторного диэлектрика. — «Электротехника», 1968, № 11, с. 16—18.

3-8. **Зингерман А. С., Кучинский Г. С., Тиханова О. В.** Пробой тонких слоев бумажно-масляной изоляции. — «Труды ЛПИ им. М. И. Калинина». М., Госэнергоиздат, 1954, № 3, с. 236—257.

3-9. **Назаров Н. И.** Кратковременная электрическая прочность диэлектрика силового конденсатора. — «Электротехническая промышленность. Высоковольтные аппараты, трансформаторы, силовые конденсаторы». Вып. 1., 1970, с. 16—18.

3-10. **Мантров М. И.** Электрические разряды по поверхности диэлектриков. — «Электричество», 1940, № 9, с. 54—56.

3-11. Техника высоких напряжений. Под ред. Л. И. Сиротинского. Т. II. М., Госэнергоиздат, 1953. 240 с.

4-1. **Partial discharge measurements.** IEC publ., № 270, 1968.

4-2. **Nye I. R., Wilson W. R.** Physical concept of corona in capacitors. — «AIEE Trans.», pt. III, 1953.

4-3. **Кучинский Г. С.** Регистрация ионизационных характеристик изоляции. — В кн.: Ионизационное старение и короностойкость высоковольтной изоляции. ЦИНТИЭлектропром. М., 1960, с. 3—9.

4-4. **Кучинский Г. С.** Зависимость интенсивности начальных частичных разрядов от напряжения. — «Труды ЛПИ», № 276. М., «Энергия», 1967, с. 91—99.

4-5. **Аронов М. А., Колечицкий Е. С., Ларионов В. П., Минин В. Ф., Сергеев Ю. Г.** Электрические разряды в воздухе при напряжении высокой частоты. М., «Энергия», 1969. 176 с.

4-6. **Kutchinsky G. S., Kaplan R. A., Pintal Y. S. a. o.** Partial discharges and service life of capacitor insulation. — «CIGRE», 1966, Rep. № 137.

4-7. **Герцик А. К.** Ионизационные характеристики бумажно-масляной конденсаторной изоляции при искаженной форме действующего напряжения. — «Изв. НИИПТ», Вып. 3, 1958, с. 66—88.

4-8. **Кучинский Г. С., Лысаковский Г. Г.** Влияние проводимости и вязкости пропитывающего состава на характеристики частич-

ных разрядов при постоянном напряжении в бумажно-масляной изоляции. — «Электричество», 1966, № 11, с. 41—45.

4-9. **Переселенцев И. Ф., Проскурнин В. П.** Частичные разряды в диэлектрике силовых бумажных конденсаторов. — В кн.: Силовое конденсаторостроение. Вып. 1. М., Информстандартэлектро, 1968, с. 52—72.

4-10. **Church H. F.** Partial discharges phenomena in power capacitors. — «CIGRE», Study Committee № 15, Working Group 05 «Capacitors», 1970.

4-11. **Пиниталь Ю. С.** Ионизационные характеристики и старение бумажно-масляной изоляции. — «Электротехника», 1965, № 1, с. 58.

4-12. **Кучинский Г. С., Литвинова Е. Л.** Электрические характеристики бумажно-масляной изоляции при избыточном давлении масла. — «Электричество», 1958, № 1, с. 64—67.

4-13. **Проскурнин В. П., Переселенцев И. Ф.** Применение синтетических пропитывающих жидкостей в силовом конденсаторостроении. — В кн.: Силовое конденсаторостроение. Вып. 1. М., Информстандартэлектро, 1968, с. 72—88.

4-14. **Назаров Н. И.** Некоторые свойства пропиточных диэлектриков для силовых конденсаторов. — «Электротехника», 1971, № 4, с. 57—60.

4-15. **Ямаути И., Томаго А.** Напряжение возникновения короны в конденсаторах с хлорированной пропиткой. — «Денки геккай дзаси», 1962, т. 82, № 4, с. 537.

4-16. **Curtis G. A.** Impregnated plastic film paper power capacitors. The BEAMA El. Ins. Conf., sess. 4, Power Capas., Paper 4a, 1970.

4-17. **Кучинский Г. С., Ойдрам Р. А.** Влияние термовakuумной обработки на характеристики частичных разрядов и срок службы изоляции силовых конденсаторов. — «Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы», 1972, вып. 4, с. 8—9.

5-1. **Морозов М. М.** Силовые конденсаторы. — В кн.: Развитие электротехники в СССР. М., ЦИНТИЭлектропром, 1962, с. 105—118.

5-2. **ГОСТ 1282-72.** Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока частотой 50 Гц.

6-1. **Кучинский Г. С.** Малоиндуктивные импульсные конденсаторы с малыми потерями в разрядном режиме. — «Электричество», 1964, № 7, с. 39—42.

6-2. **Нейман Л. Р., Калантаров П. Л.** Теоретические основы электротехники. Т. III. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954. 444 с.

6-3. **Назаров Н. И.** Работа бумажно-масляных конденсаторов при несинусоидальном напряжении. — «Известия вузов. Энергетика», 1960, № 1, с. 49—53.

6-4. **Медведев С. К.** Перегрузки и потери мощности в конденсаторах при наличии высших гармонических. — «Электротехника», 1966, № 12, с. 45—48.

6-5. **Ehresmann W.** Dauerüberlastung von Leistungskondensatoren. — «Elektro-Anz.», Ausgabe ges. Ind., 1961, № 21.

6-6. **Гоголицын Л. З.** Определение потерь в конденсаторе в импульсном режиме. — «Электричество», 1957, № 9, с. 41—45.

6-7. **Тареев Б. М., Лернер М. М., Лернер Т. И.** К расчету тепловых потерь в электрическом конденсаторе при воздействии несинусоидального напряжения. — «Электричество», 1970, № 5, с. 72—77.

6-8. **Лернер М. М.** Учет длительности нарастания несинусо-

идального напряжения при расчете тепловых потерь в конденсаторе. — «Электричество», 1971, № 2, с. 69—72.

6-9. **Peyssou I.** Condensateurs soumis à des impulsion de tension prevision du echauffement. — «Radio electr.», 1956, vol. II, № 46, p. 19—24.

6-10. **Чудновский А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., Физматгиз, 1962. 456 с.

6-11. **Terada T., Ito N., Goto I.** Effective thermal conductivity of insulating paper. — «J. Japan. Techn. Assoc. Pulp and Paper Ind.», 1969, vol. 23, № 5, p. 191—197.

6-12. **Назаров Н. И.** Коэффициент запрессовки и уменьшение потерь в бумажно-масляном конденсаторе. — «Вестник электропромышленности», 1962, № 1, с. 14—16.

6-13. **Назаров Н. И.** Коэффициенты теплопроводности секции бумажно-масляного конденсатора. — «Изв. вузов. Энергетика», 1962, № 10, с. 46—51.

6-14. **Михеев М. А.** Основы теплопередачи. М., Госэнергоиздат, 1956. 415 с.

6-15. **Шорин С. Н.** Теплопередача. М., «Высшая школа», 1964, 490 с.

7-1. **Шнейдер П.** Инженерные проблемы теплопроводности. М., Изд-во иностр. лит., 1960. 478 с.

7-2. **Назаров Н. И.** Оптимальная конструкция силового конденсатора. — «Электротехническая промышленность. Высоковольтные аппараты, трансформаторы, силовые конденсаторы». Вып. 3, 1970, с. 13—16.

7-3. **Sawicki J.** Przebiegi temperatury w kondensatorze energetycznym. — «Rozprawy elektrotechn.», vol. XIII, Zeszyt 3, 1967, S. 507—525.

7-4. **Табакс К. К., Фрейманис У. А.** К расчету температурного поля в анизотропной призме с внутренними источниками тепла «Уч. Зап. Рижск. политехн. ин-та», Т. XIV, вып. 5. Рига, 1965, с. 255—268.

7-5. **Медведев С. К.** Бумажно-масляные конденсаторы. — «Вестник электропромышленности», 1950, № 11, с. 3—10.

7-6. **Фрейманис У. А.** К тепловому расчету бумажно-масляного конденсатора. «Уч. Зап. Рижск. политехн. ин-та», Т. XIV, вып. 5. Рига, 1965, с. 269—276.

7-7. **Готтер Г.** Нагревание и охлаждение электрических машин М., Госэнергоиздат, 1961, 480 с.

7-8. **Назаров Н. И., Назарова Г. Т.** Об определении реактивной мощности в конденсаторной единице. — «Электричество», 1961, № 7, с. 55—59.

7-9. **Назаров Н. И.** Геометрические факторы и тепловые свойства сильнооточного конденсатора. — «Известия вузов. Энергетика», 1966, № 6, с. 33—39.

7-10. **Фертик С. М.** Геометрия высоковольтного конденсатора. — В кн.: Сборник научно-технических статей Харьковского политехнического ин-та. М., Госэнергоиздат, 1941, с. 40—52.

7-11. **Медведев С. К.** Удельные и тепловые характеристики силовых конденсаторов. — «Электротехническая промышленность», 1962, № 3, с. 64—67.

7-12. **Пирсон М.** Влияние улучшения качества бумаги на характеристики конденсатора. — «СИГРЭ», докл. № 112, 1958.

7-13. **Медведев С. К.** Конденсаторы повышенной частоты с диэлектриком из пропитанной бумаги. — «Вестник электропромышленности», 1958, № 4, с. 35—38.

7-14. **Marbury R. E.** Power capacitors units [Westingh. El. Corp.]. Pat. (США) № 3018427.

7-15. **Linderholm S.** Capacitor cooling (The Ohio Brass Co.). Pat. (США) № 25644.

7-16. **Wurster J. M.** Electric capacitors cooling means [GEC]. Pat. (США) № 3219892.

7-17. **Robinson W. M.** Capacitor including internal heat dissipating structure [Cornell-Dubilier El. Corp.]. Pat. (США) № 3483448.

7-18. **Gerstenkorn A., Tkotz M.** Anordnung zur Kühlung von in geschlossenen Gehäuse angebrachten Starkstromkondensatoren. Pat. (ФРГ) № 113659.

8-1. **Кучинский Г. С.** Высоковольтные импульсные конденсаторы. Л., «Энергия», 1973. 176 с.

8-2. **Linder L., Schneidermann T.** Einfluss der Eigeninduktivität von Wickelkondensatoren auf ihrem Scheinwiderstand, ETZ, 1939, № 27, S. 19—21.

8-3. **Кучинский Г. С., Иркаева К. М.** Индуктивность конденсаторов с рулонными секциями. — «Вестник электропромышленности», 1961, № 11, с. 38—41.

8-4. **Фоменко Л. А.** Индуктивность конденсаторов. — «Известия электропромышленности», 1961, № 11, с. 47—53.

8-5. **Tobe Deterschmann** Residant. Condensateur electrique. Pat. № 1350466 (Франция).

8-6. **Гольденберг Г. М.** Бумажные силовые конденсаторы. М., Изд. ЦНИИПИ, 1965. 32 с.

8-7. **Siemens.** Verfahren zur Herstellung eines elektrischen Wickelkondensator mit geringen Eigeninduktivität. Pat. № 1133036 (ФРГ).

8-8. **Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.** Расчет индуктивностей. М., «Энергия», 1970. 415 с.

9-1. **Медведев С. К.** Перегрузочные характеристики бумажно-масляных конденсаторов. — «Вестник электропромышленности», 1961, № 11, с. 42—45.

10-1. **Fabre Z., Pichon A.** Deteriorating processes and products of paper in oil. Application to transformer. — «CIGRE», 1960, Rap. 137.

10-2. **Montsinger V. M.** Loading transformers by temperature. — «Trans. Amer. Inst. Electr. Engr.», 1930, vol. 49, p. 776.

10-3. **Stamm H.** Neuere Untersuchungsergebnisse an Papier — Öl — Isolation. — «Wiss. — Techn. Mitteilungen des Insts — Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik», 1967, № 11.

10-4. **Медведев С. К.** Измерение угла диэлектрических потерь при одновременном наложении постоянного и переменного напряжения. — «Электричество», 1952, № 6, с. 52—54.

10-5. **Назаров Н. И.** Испытания косинусных конденсаторов на надежность. — «Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы». Вып. 12 (32), 1973, с. 20—21.

10-6. **Held W., Kunze R. C.** Glimmentladung und Lebensdauer von Starkstromkondensatoren. — «ETZ-A», 1961, Bd 82, № 11.

10-7. Kucinskij G. S., Ojdran R. A. Životnost papierovych silnoprudovych kondensatorow, impregnovanych mineralnym olejom a trichlordifenylo m a jej zavislost od tepelno—vacuoveho spracovania. Zbornik referatov z II midzinarodneho symposia o vyuziti chlorovanych difenilov v elektrotechnike. CSSR, Bratislava, 1971, S. 44—69.

10-8. Krasucki Z. Modern developments in dielectrics for power capacitors. The BEAMA El. Insul. Conf. Sess. 4, Pow. Cap., pap. 4, 1970.

10-9. Weller W. G., Church H. F. Solid particles in liquid impregnated paper capacitors. The BEAM El. Insul. Conf., Sess. 4, Pow. Cap., pap 4d, 1970.

10-10. Church H. F., Garton C. G. Electrical breackdown of organic insulation from electrochemical reaction. — «Nature», 1962, № 4112, 1948, p. 301.

10-11. Карабанов В. И., Иванов С. Б. Пути повышения удельных характеристик бумажных высоковольтных конденсаторов. — «Электронная техника. Сер. 8 Радиодетали». Вып. 2, 1967, с. 3—10.

10-12. Menkart G. R., Waldon P. L. New SxT formula uses temperature and voltage as key to longer life capacitors. — «CIGRE», 1964, S1/S8.

10-13. Варшавский Д. С. Пути повышения качества силовых конденсаторов. М., ЦИТИЭлектропром, 1963. 216 с.

10-14. Варшавский Д. С. Ускоренные испытания конденсаторов переменного тока на срок службы. — «Известия вузов. Энергетика», № 12, 1969, с. 98—102.

10-15. ГОСТ 13377-67 Надежность в технике. Термины.

10-16. Назаров Н. И., Соколов В. П. Надежность силовых конденсаторов. — «Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы», вып. 1 (21), 1973, с. 34—35.

10-17. Заренин Ю. Г. Контрольные испытания на надежность. М., Стандартгиз, 1970. 124 с.

10-18. Половко А. М. Основы теории надежности. М., «Наука», 1964. 446 с.

10-19. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности. М., «Советское радио», 1968. 284 с.

11-1. Варшавский Д. С. Срок службы комбинированной конденсаторной изоляции на переменном токе. XI научно-техническая конференция УКСДИ. Усть-Каменогорск, 1971.

11-2. Кучинский Г. С., Литвинова Е. Л., Морозов Е. А. Импульсные конденсаторы с пленочно-бумажным диэлектриком. — «Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы». Вып. 1 (21), 1973, с. 27—30.

11-3. Zanobetti D., Mochi E. G. Characteristics of power capacitors with composite impregnated paper and polypropylene dielectric. — «CIGRE», Study Comm. № 18, 1968, Paris.

11-4. Shunt-capacitors: NEMA-Standard. Publication № Cp 1, New-York, 1973.

12-1. Power capacitors. IEC-publication, 70, 1967.

12-2. Recommendations for capacitors for inductive heat generating plants operating at frequencies between 40 and 24 000 Hz. IEC-publication, 110, 1973.

- 12-3. **Coupling** capacitors and capacitor dividers. IEC-publication 358, 1971.
- 12-4. **ГОСТ 15581-70.** Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности и измерения напряжения в фарфоровых корпусах.
- 12-5. **Dakin T. W., Lim I.** Corona measurement and interpretation. — «Pow. App. Syst.», 1957, № 6, p. 1059.
- 12-6. **Кучинский Г. С., Таупере О. О.** Регистрация ионизационных характеристик изоляции. — «Электричество», 1960, № 11, с. 42—48.
- 12-7. **Kreuger H. F.** Discharge detection in high voltage equipment. London, 1964, 223 p.
- 12-8. **Конторович М. И.** Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. М., Гостехиздат, 1955. 227 с.
- 12-9. **Mole G., Paroff P. G., Kendall P. G.** Measurement of the magnitude of internal discharges in power capacitors. — «Proc. IEE», 1969, vol. 116, p. 847.
- 12-10. **Series** capacitors for power systems. IEC-publication, № 143, 1963.
- 12-11. **Coupling** capacitors for power systems. Brit. Stand. № 1650, 1963.
- 12-12. **ГОСТ 20074-74.** Электрооборудование и изоляция на напряжение свыше 1000 В. Методы измерения характеристик частичных разрядов.
- П-1. **Поляков Б. А.** Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности. М., Госэнергоиздат, 1962. 232 с.
- П-2. **Ильяшов В. П.** Конденсаторные установки промышленных предприятий. М., «Энергия», 1972. 248 с.
- П-3. **Конденсаторы.** Каталог № 7.9 фирмы НОКИА (Финляндия). -

ОГЛАВЛЕНИЕ ★

Предисловие	3
Глава первая. Общие сведения о силовых конденсаторах	5
1-1. Особенности и классификация силовых конденсаторов	5
1-2. Конструкции силовых конденсаторов	7
1-3. Компенсация температурного расширения объема жидкого диэлектрика	16
Глава вторая. Материалы, применяемые при изготовлении силовых конденсаторов	18
2-1. Конденсаторная бумага	18
2-2. Синтетические полимерные пленки и бумажно-пленочный диэлектрик	31
2-3. Пропитывающие диэлектрики	36
2-4. Влияние технологических факторов на характеристики диэлектрика	65
Глава третья. Кратковременная электрическая прочность изоляции конденсаторов	69
3-1. Электрическое поле в конденсаторе	69
3-2. Влияние толщины и площади диэлектрика на кратковременную электрическую прочность	72
3-3. Зависимость кратковременной электрической прочности от температуры, частоты и формы воздействующего напряжения	77
3-4. Электрическая прочность секции по закраине	79
Глава четвертая. Частичные разряды в изоляции конденсаторов	80
4-1. Основные характеристики частичных разрядов	80
4-2. Частичные разряды при переменном напряжении	82
4-3. Зависимость напряжения частичных разрядов от толщины диэлектрика	91
4-4. Влияние различных факторов на характеристики частичных разрядов	93
4-5. Частичные разряды при постоянном напряжении	101
Глава пятая. Электрический расчет силового конденсатора	104
5-1. Исходные данные для расчета	104
5-2. Удельные характеристики конденсатора	105
5-3. Расчет емкости секции и пакета	109
5-4. Расчет изоляции пакета от корпуса	110
Глава шестая. Тепловые процессы в силовых конденсаторах	112
	245

6-1. Тепловыделение в конденсаторе при синусоидальном напряжении	112
6-2. Потери в металлических частях	114
6-3. Потери в конденсаторе при сложной форме кривой напряжения	117
6-4. Теплофизические характеристики конденсаторных материалов	123
6-5. Расчет коэффициентов теплопроводности различных участков секции	125
6-6. Коэффициенты теплообмена конденсаторов с охлаждающей средой	129
Глава седьмая. Тепловой расчет конденсатора	135
7-1. Особенности теплового расчета и уравнение теплопроводности	135
7-2. Аналитические методы определения температурного поля в силовом конденсаторе	139
7-3. Приближенные методы теплового расчета	143
7-4. Влияние соотношения размеров конденсатора на температуру диэлектрика	148
7-5. Определение границы термической устойчивости графоаналитическим методом	150
7-6. Тепловой расчет электротермических конденсаторов	155
7-7. Методы улучшения теплоотвода	157
7-8. Нестационарный тепловой режим конденсатора	158
Глава восьмая. Расчет индуктивности конденсаторов	160
8-1. Расчет индуктивности секций	160
8-2. Расчет индуктивности предохранителей и выводов конденсатора	171
8-3. Расчет индуктивности шин, соединяющих секции конденсатора с выводами, и индуктивности конденсатора	173
8-4. Оптимальные параметры конденсатора по резонансной частоте	176
Глава девятая. Перегрузочные характеристики силовых конденсаторов	179
9-1. Определение перегрузок конденсатора в различных режимах	179
Глава десятая. Срок службы и надежность конденсатора	182
10-1. Физическая природа и виды старения изоляции конденсаторов	182
10-2. Общие закономерности теплового старения клетчатки	184
10-3. Ионизационное старение	189
10-4. Электрохимическое старение	192
10-5. Изменение электрической прочности в процессе старения	194
10-6. Надежность силовых конденсаторов	198
Глава одиннадцатая. Выбор рабочей напряженности электрического поля	202
11-1. Общие соображения по выбору допустимой рабочей напряженности	202

11-2. Выбор рабочей напряженности по характеристикам частичных разрядов	204
11-3. Особенности выбора рабочих напряженностей для конденсаторов, работающих при постоянном и импульсном напряжениях	209
Глава двенадцатая. Основные испытания силовых конденсаторов	211
12-1. Условия эксплуатации и испытания конденсаторов для повышения коэффициента мощности	211
12-2. Испытания конденсаторов на термическую стабильность	213
12-3. Измерение характеристик частичных разрядов	216
12-4. Испытания импульсных конденсаторов	228
<i>Приложение</i>	<i>233</i>
<i>Список литературы</i>	<i>236</i>